

Tuomas Ahonen

# Lohkarekoon ja siirtymän hallinta avolouhinnassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

24.4.2017

Tekijä(t) Otsikko	Tuomas Ahonen Lohkarekoon ja siirtymän hallinta avolouhinnassa
Sivumäärä Aika	44 sivua 24.4.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Infrarakentaminen
Ohjaaja(t)	Lehtori Mika Räsänen Vastaava mestari Olli Vaaramaa
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia kiven lohkaroitumista, lohkarokokoa, ja räjäytyskentän siirtymää avolouhinnassa. Lohkaroitumisella tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin kivi hajoaa räjäytyksen aikana. Lohkarekoolle tarkoitetaan sitä, minkä kokoisiksi kappaleiksi kivi hajoaa räjäytyksen lopputuloksena. Räjäytyskentän siirtymällä tarkoitetaan sitä, kuinka paljon kiven painopiste muuttuu, kun se räjäytetään. Työ tehtiin kevään 2017 aikana.</p> <p>Työssä alussa käytiin läpi erilaisia avolouhintamenetelmiä, louhintakalustoa ja käytettäviä räjähteitä teoriatasolla. Työssä tutkittiin sen jälkeen, mitkä tekijät vaikuttavat kallion lohkaroitumiseen ja lohkarerekoon, ja miten niihin voidaan vaikuttaa. Lisäksi työssä kokeiltiin esimerkinomaisesti muutamaa lohkarerekoon arviointiin kehitettyä mallia, sekä tutkittiin räjäytetävän kentän heittoa ja yksittäisten kivien sinkoilua.</p> <p>Aineisto työhön koottiin louhinta-alan kirjallisuutta käyttäen ja alan ammattilaisia haastatella. Lohkarerekoon optimointi on yksi osa taloudellisesti onnistunutta louhintatyötä.</p>	
Avainsanat	avolouhinta, lohkaroituminen, lohkar koko, siirtymä, heitto

Author(s) Title	Tuomas Ahonen Controlling fragmentation and throw in opencast blasting
Number of Pages Date	44 pages 24 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Infrastructural Engineering
Instructor(s)	Mika Räsänen, Senior Lecturer Olli Vaaramaa, Foreman
<p>The purpose of this thesis was to examine rock fragmentation, fragment size, and the throw of the rock in bench blasting. The terms fragmentation and fragment size are used to describe the change in the rock blasted. Better fragmentation and smaller fragment size mean that the rock was crushed successfully into smaller fragments. The term throw of the rock means how much the rock moved towards the free-face during the blasting process. This thesis was done during spring of 2017.</p> <p>The first part of the thesis studies the theory of different methods used in opencast blasting. Rock drills and explosives used in opencast blasting were also discussed. The main part of the thesis investigates, what factors affect rock fragmentation and mean fragment size in opencast blasting. Throw of the rock and flyrock in blasting are also briefly examined.</p> <p>The data for the thesis was collected by using literature related to opencast blasting. Blasting professionals were also interviewed. Optimizing fragmentation is one part of economically successful blasting job.</p>	
Keywords	bench blasting, fragmentation, fragment size, throw

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Kiviaines rakennuskäytössä	1
1.2	Metallimalmit ja teollisuusmineraalit	3
1.3	Louhinta-alan kehitys	4
1.4	Työn tausta	4
1.5	Työn tavoite	5
1.6	Aiheen näkökulma & rajaus	5
2	Avolouhinta	7
2.1	Pengerlouhinta	7
2.2	Kanaalilouhinta	9
2.3	Tarkkuuslouhinta	10
2.3.1	Rakolinja menetelmä	11
2.4	Kalusto	12
2.5	Räjähteet	14
2.6	Louhintaan liittyvä lainsäädäntö	16
3	Lohkarekoko	18
3.1	Kallion ja räjähdysaineen vaikutus	19
3.2	Porauksen vaikutus	20
3.3	Panostuksen vaikutus	21
3.4	Sytytyksen ja hidastuksen vaikutus	22
3.5	Lohkarekoon arviointi ja hallinta	25
3.5.1	Esimerkkilasku	28
3.6	Suuri lohkarekoko	30
4	Siirtymä ja sinkoilu	32
4.1	Kentän siirtymä	32
4.2	Kiven sinkoutuminen	34
5	Kenttätutkimus	36

6	Tulokset	39
7	Pohdinta	42
	Lähteet	43

## Termit

Kynsi	Pohjalle jäänyt epätasaisuus räjäytetyssä kentässä
Ominaispanostus	Yhden kuutiometrin kalliota irrottamiseen käytetty räjähdemäärä, symboli $q$ , yksikkö $\text{kg/m}^3$
Ominaisporaus	Yhden kuutiometrin kalliota irrottamiseen käytetty poramäärä, symboli $b$ , yksikkö $\text{pm (porametrejä) / m}^3$

## 1 Johdanto

Kalliorakentaminen on yksi infrarakentamisen osa-alue. Se voidaan jakaa edelleen maanalaiseen kalliorakentamiseen ja maanpäälliseen kalliorakentamiseen. Maanalaiseen kalliorakentamiseen kuuluvat esimerkiksi liikennetunnelit, pysäköintilaitokset, väestönsuojat, yhdyskuntatekniset tilat, vapaa-ajan tilat ja ydinjätteen loppusijoituspaikat. Maanpäällistä kalliorakentamista on esimerkiksi rakennusten pohjien louhinta, tie- ja rautaleikkaukset, kanaalilouhinta putkia varten, ja kaivos- sekä kiviainestoiminta. Kaivosala tuottaa metallimalmeja ja mineraaleja, ja avolouhoksilla tuotetaan kiviainesta yleisesti rakentamista varten.

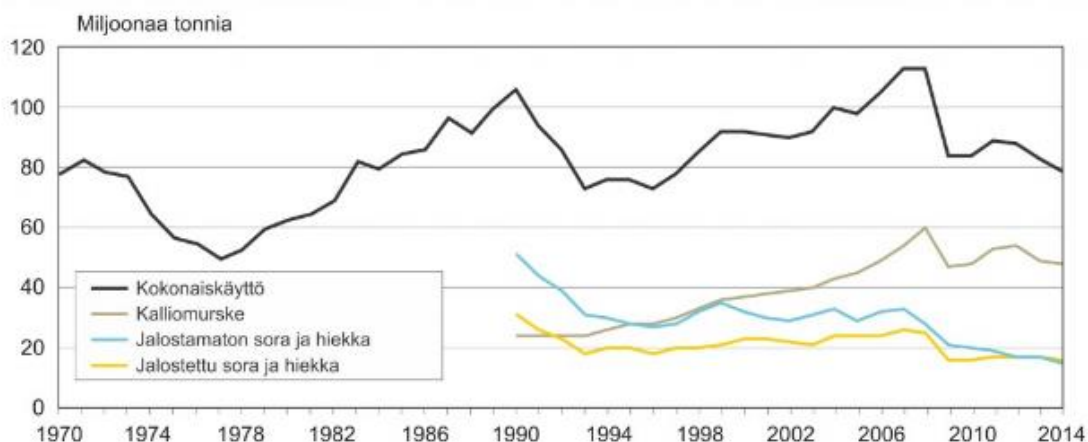
Ihmiset muuttavat kaupunkeihin, ja kaupunkirakenteet tiivistyvät koko ajan. Toimiva infra on ehdoton edellytys toimivalle kaupungille. Tällä hetkellä Helsingistä löytyy 400 kpl maanalaisia tiloja, 200 km tunneleita, 60 km veden- ja energianjakelutunneleita. Helsingin kaupungin alueelle on laadittu maanalainen yleiskaava, mikä ohjaa kalliorakentamista. Kaava tuli voimaan 2011, ja se on ensimmäinen maanalainen yleiskaava Suomessa. [1.]

Käynnissä olevia kalliorakennushankkeita pääkaupunkiseudulla länsimetron lisäksi on esimerkiksi Olympiastadionin perusparannus ja uudistamishanke, sekä Blominmäen jätevedenpuhdistamon rakentaminen. Olympiastadionin hanke on mielenkiintoinen louhintateknisistä syistä, siellä louhitaan kalliota aivan jo olemassa olevien rakenteiden vierestä. Blominmäen jätevedenpuhdistamolla on louhittu jo yli 700 000 kuutiometriä kiveä. Valmistuttuaan vuonna 2020 se käsittelee 400 000 asukkaan jätevedet, ja toimii itse tuottamallaan energialla. [2,3.]

### 1.1 Kiviaines rakennuskäytössä

Kiviaines on tärkeä rakennusaine lähestulkoon kaikilla rakentamisen osa-alueilla. Sitä on laajasti saatavilla ja se on aikaa ja kulutusta kestävä rakennusaine. Kiviainesta tarvitaan sellaisenaan esimerkiksi talojen ja teiden pohjarakenteissa. Avolouhoksilla louhittua kiveä jalostetaan eteenpäin erilaisiksi murskeiksi. Eri käyttötarkoituksiin tuotetaan erilaisia murskeita. Murskeet eroavat toisistaan niiden sisältämien kappaleiden koon mukaan, eli eri murskeilla on erilaiset rakeisuuskäyrät. Esimerkiksi kalliomurske tierakenteessa

sisältää kappaleita kooltaan 0-32 mm, kun taas raidesepeli sisältää pääasiassa 31,5-63 mm kappaleita. Murskeita käytetään raaka-aineina betonissa ja asfaltissa.



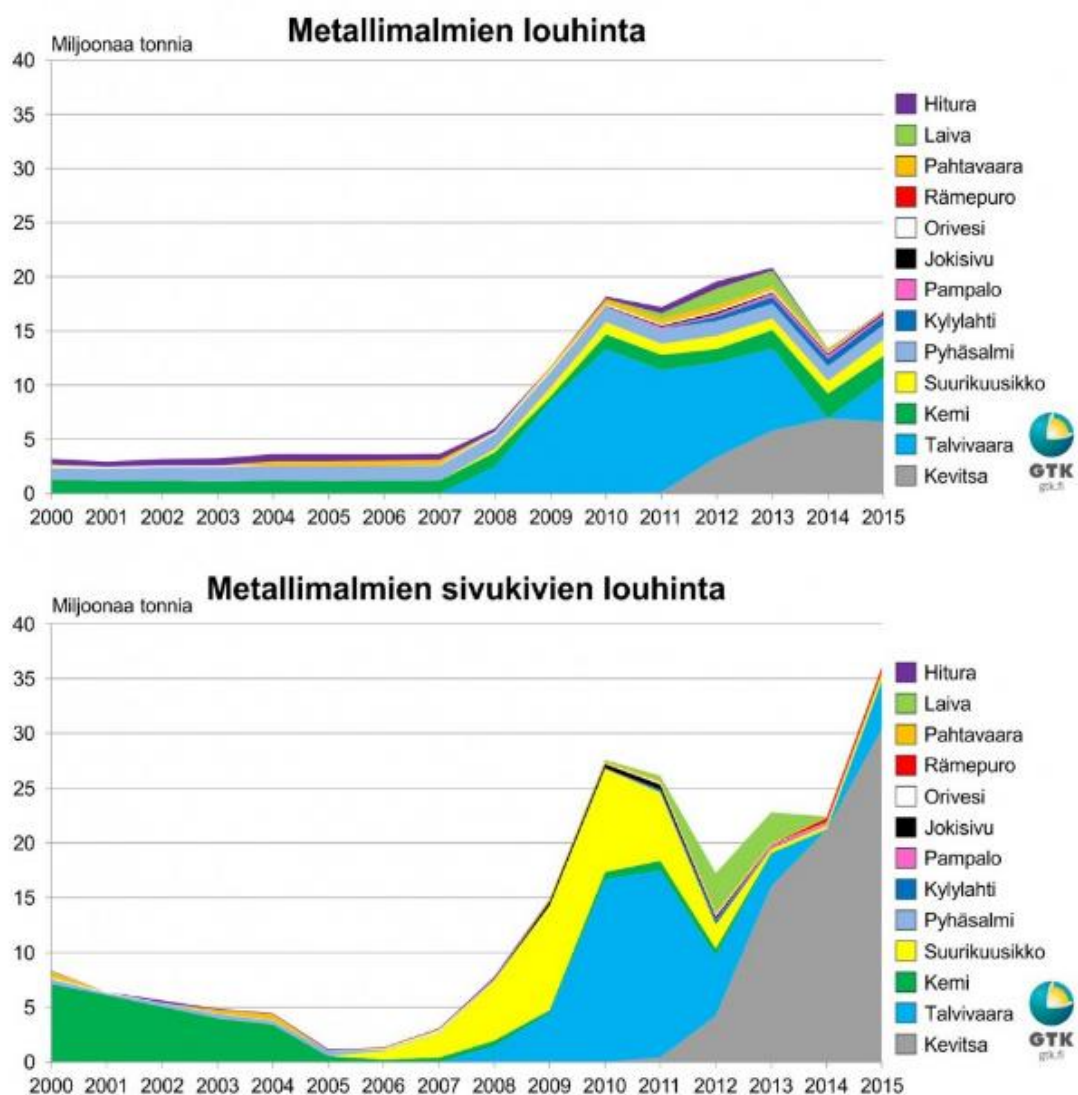
Kuva 1. Kiviainesten arvioitu käyttö Suomessa. Lähde: 1970–1989 Laine (1994) , 1990–2014 SYKE, Infra ry

Kiviainesten käyttö vaihtelee sykleittäin taloudellisen tilanteen mukaan. Vuodesta 2008 eteenpäin taantuma taloudessa näkyy rakennusalamassa ja sitä kautta kiviaineksen käytössä. Haasteita kiviainestuottajille tällä hetkellä on matalat öljyn ja metallien hinnat, sekä koko ajan kiristynvä kilpailu. Muita haasteita on laatu- ja ympäristövaatimusten kiristyminen, ja sitä kautta tapahtuva hyvien ottoalueiden väheneminen ja kuljetusmatkojen lisääntyminen. Kalliomurskeen käyttö tulee todennäköisesti kasvamaan tulevaisuudessa, sillä luonnon omille sora- ja hiekka varannoille myönnetään koko ajan vähemmän ja vähemmän ottolupia. [4,5,6.]



## 1.2 Metallimalmit ja teollisuusmineraalit

Kaivosteollisuus tuottaa mineraaleja ja metalleja, kuten kultaa, kuparia, ferrokromia, sinkkiä, litiumia ja nikkeliä. Kaivosala on merkittävä tekijä, koska se synnyttää valtaosan koko yhteiskunnan jätemäärästä, ja käyttää valtaosan louhintatöissä käytettävistä räjähteistä. Kaivannaisala työllisti vuonna 2013 noin 25 000 henkilöä, ja alan yhteenlaskettu liikevaihto oli noin 14 miljardia euroa. Suomi ja Ruotsi ovat edelläkävijöitä erityisesti maanalaisessa kaivosteknologiassa, sillä jopa 70 prosenttia maanalaisten kaivosten teknologiasta tulee Suomesta tai Ruotsista. [4,5,6.]



Kuva 2. Eri kaivosten osuus metallimalmien ja sivukivien louhintamäärien kehitykseen. [6.]

Metallimalmien louhintamäärän huippu oli vuonna 2013. Määrän pieneneminen sen jälkeen johtuu lähinnä Talvivaaran erinäisistä ongelmista. Vuosina 2009 – 2011 Talvivaara

oli Suomen suurin metallimalmikaivos. Nykyään suurin metallimalmikaivos on Kevitsan kaivos. Kaivostoiminnan haasteita ovat suuri pääoman tarve ja ympäristöasiat. Kaivostoiminta yhdessä rakennustoiminnan kanssa tuottaa ylivoimaisesti suurimman osan syntyvistä jätteistä. Tähän pyritään vaikuttamaan nyt ja tulevaisuudessa lainsäädännöllä, tukemalla teknologian ja materiaalien uusiokäytön kehitystä. [5,6,7.]

Yleinen matala korkotaso houkuttelee investoimaan, mutta korkotason nouseminen saattaa aiheuttaa ongelmia paljon pääomaa tarvitseville aloille, kuten kaivosalalle.

### 1.3 Louhinta-alan kehitys

Louhinta-alalla käytettävät räjähteet, sytytysvälineet, kalusto ja työmenetelmät ovat kehittyneet paljon sitten dynamiitin keksimisen. Dynamiitti oli vielä 1960-luvulla suosituin räjähdde, kun taas nykypäivänä ylivoimaisesti suosituin räjähdetyyppi on emulsioräjähteet. Emulsiolla on nopea panostaa, se on muunneltavissa käyttökohteen ja sen tarpeiden mukaisesti, ja se on ympäristöystävällisempää kuin perinteiset patruunatyyliset räjähddeaineet. [8, s.22.]

Suurin kehitys louhinta-alalla on tapahtunut porakalustossa. Ensimmäiset porakoneet kehitettiin 1850-luvulla, ja sitä ennen reikä kallioon tehtiin käsin. Ensimmäisten porakoneiden tunkeutuvuus kallioon oli luokkaa 0,5 – 2,5 metriä / päivässä. Nykypäivänä pätevä porari voi porata 30 – 40 metriä tunnissa. Tietokoneiden kehitys on vaikuttanut poravaunujen kehitykseen 1980-luvulta eteenpäin. Nykyään on olemassa kauko-ohjattavia poravaunuja, ja suoritetusta porauksesta saadaan millintarkkaa tietoa, mikä voidaan lähettää langattomasti esimerkiksi työmaainsinöörin tietokoneelle. Tämä kehitys on nostanut vaatimuksia poraustarkkuudelle, ja sitä kautta ylipäättään louhinnan tarkkuudelle [8 s.24.]

### 1.4 Työn tausta

Kaikkia tähän asti mainittuja kalliorakentamisen osa-alueita yhdistää kiven irrottaminen räjähteillä, eli louhinta. Ennen vanhaan pelkän kiven irrottaminen saattoi olla jo tarpeeksi iso haaste. Louhinta-alan kehityksen myötä koko louhintaprosessille tai sen yksittäisille

osille voidaan antaa yhä tarkempia vaatimuksia. Vaatimukset voivat liittyä louhintatyössä syntyvään jätteeseen, räjäytystyön aikaisiin tärinäihin, louhinnan lopputuloksen tarkkuuteen, tai louhinnan lopputuloksena syntyvän irrotetun kiviaineksen koostumukseen. Eri-tyyppisille louhintatöille asetetaan erilaisia vaatimuksia. Asutuskeskuslouhinnoissa tärinän ja kivien sinkoilun estäminen on yksi tärkeimmistä lähtökohdista.

Yksi louhintatyön suunnittelun lähtökohdista voi olla louheen lohkokoko ja räjäytettävän kentän heitto eli siirtymä. Lohkokokoolla tarkoitetaan sitä, kuinka pieniksi kappaleiksi kivi räjäytetään louhinnan tuloksena. Lohkokeroon lisäksi voidaan analysoida hienoaineksen, ja ylisuurten lohkokoiden määrää. Heitolla, eli siirtymällä tarkoitetaan kiven painopisteen muutosta louhinnan aikana. Jos kivi vain rikkoutuisi, mutta ei siirtyisi ollenkaan, olisi sen lastaaminen ja kuljettaminen hankalaa ja aikaa vievää.

Lohkokokoon louhinnassa voidaan vaikuttaa useilla eri tekijöillä. Tämän työn tarkoitus on tutkia näitä tekijöitä.

### 1.5 Työn tavoite

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia kiven lohkaroitumista, lohkokokoa ja räjäytyskentän heittoa eli siirtymää. Työssä käydään aluksi läpi avolouhinnan työmenetelmiä ja teoriaa niiden taustalla. Sen jälkeen tarkoituksena on tutkia ja selvittää, miten eri tavoin toteutettu louhinta vaikuttaa lohkokokoon ja kentän heittoon. Työssä käydään läpi porauksen, panostuksen, sytytyksen ja hidastuksen vaikutusta lohkokokoon ja heittoon. Lisäksi työssä käydään läpi, miten lohkokeroon hallintaa on tutkittu vuosien mittaan, ja millaisia malleja sen arviointiin on kehitetty.

### 1.6 Aiheen näkökulma & rajaus

Tämän työn ohjaajana toimii Destia Oy:n Kalliorakentaminen yksikön vastaava mestari Olli Vaaramaa. Työn tehdään Destia Oy:n näkökulmasta, eli työssä keskitytään lähinnä niihin työtapoihin ja menetelmiin, mitä Destia Oy käyttää toiminnassaan.

Destia Oy suunnittelee ja tekee niin tunneli-, kuin avolouhintaa. Tämä työ rajataan koskemaan avolouhinta puolta. Aineistona käytetään louhinta-alan kirjallisuutta, internet-lähteitä ja työmaiden asiakirjoja. Työn tärkeimmät tutkimuskysymykset ovat:

Miten kiven lohkokokoon voidaan vaikuttaa?

Miten räjäytyskentän heittoa eli siirtymää hallitaan?

## 2 Avolouhinta

Avolouhinnalla tarkoitetaan maanpäällä tapahtuvaa louhintaa. Avolouhinta ei pidä sisällään maanalaista tai vedenalaista louhintaa. Avolouhintaa voidaan tehdä erilaisilla työmenetelmillä, ja avolouhintaa voidaan jakaa edelleen esimerkiksi pengerlouhintaan, kaanaalilouhintaan ja tarkkuuslouhintaan. Avolouhintaa liittyy moneen eri rakentamisen osaluokkaan, esimerkiksi kaivostoimintaan, murskaamotoimintaan, tarvekiven hankintaan, ja rakennusten pohjien louhintaan. [8 s.125, 9. s.91-92.]

Erilaisissa kohteissa avolouhintaa rajoittaa erilaiset tekijät, ja sen onnistumista voidaan mitata eri tavoin. Asutuskeskuksissa louhittaessa tärkeää on, että tärinät pysyvät pieninä, eikä yksittäisiä kiviä pääse sinkoilemaan hallitsemattomasti. Kaivos- ja murskaamotoiminnassa oleellista on kiven heitto ja lohkaroituminen. Sopiva heitto helpottaa lastausta, ja sopiva lohkarokoko pienentää murskauskustannuksia ja pidentää murskainten käyttöikää. Yhdessä nämä tekijät pienentävät kustannuksia pitkässä juoksussa.

Tässä kappaleessa käydään teoriallasella läpi mitä eri avolouhintamenetelmät pitävät sisällään ja miten ne eroavat toisistaan. Kappaleessa käydään myös läpi avolouhinnassa käytettävää kalustoa, käytettävät räjähteet, ja louhintatöihin liittyviä lakeja.

### 2.1 Pengerlouhintaa

Pengerlouhintaa on yleisin louhintamenetelmä. Pengerlouhinnan työvaiheet ovat työn suunnittelu, pintamaiden poisto, poraus, panostus, rikotus ja kuljetus. Työn kulku menee pääpiirteittäin niin, että kallioon porataan yleensä hieman kallistetut reiät, jotka panostetaan, ja räjäytetään. Porauksesta, panostuksesta ja räjäytyksestä käytetään termiä irrotus. Irrotuksen jälkeen mahdollisia ylisuuria lohkarokkeita voi joutua rikkomaan pienemmiksi. Tämä tehdään helpottamaan lastausta ja poiskuljetusta. Viimeinen työvaihe on louheen poiskuljetus. [9, s.93.]



Ominaisporauksen kasvu tasauslouhinnassa johtuu siitä, että pohjan varman irtoamisen kannalta edun tulee olla reikäsyvyyttä pienempi. Kasvava ominaisporaus lisää kustannuksia, ja ominaispanostuksen kasvaminen lisää hallitsemattoman heiton ja sinkoutumisen riskiä. Tästä johtuen tasauslouhinnassa reikien syttymisaikaväli tulisi pitää mahdollisimman lyhyenä, ja kenttä peittää huolellisesti. Tasauslouhinnassa on mahdollista lisätä ohiporauستا ja samalla suurentaa etua ja reikäväliä. Tällöin hallitsemattoman heiton ja sinkoilun riski vähenee. Ohiporauksen lisääminen ei kuitenkaan ole aina mahdollista, jos louhinta on esimerkiksi rajoitettu tiettyyn syvyyteen. [8 s.141 & 166.]

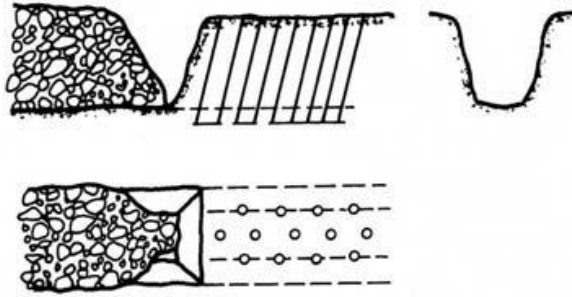
Pengerlouhintaa voidaan suunnitella käsin laskemalla, taulukoita käyttäen, tai tietokone ohjelmilla.

## 2.2 Kanaalilouhinta

Kanaalilouhinnassa tärkein ero tavanomaiseen pengerlouhintaan verrattuna on kiven purkautumissuunta. Tavanomaisessa pengerlouhinnassa kivi pääsee purkautumaan penkereen suuntaisesti ja ylöspäin taivasta kohti. Kanaalilouhinnassa purkautumissuunta saattaa olla pelkästään ylöspäin. Kanaaleita louhitaan esimerkiksi putki- ja kaapelilinjoja varten. [8, s.155-156.]

Kanaalilouhinnassa pengerleveys on alle 4 metriä. Kanaalin muodon takia kanaalilouhinnassa tarvitaan perinteistä pengerlouhintaa suurempi ominaispanostus. Suurempi ominaispanostus vaatii tiheämpää porauskaaviota. Suurempaan ominaispanostukseen voidaan päästä suurentamalla reikäkokoa, jos käytetään irtoräjähteitä, mutta tämä lisää ryöstöjen määrää. Kanaalilouhinnassa reikien kallistus on tärkeää irti leikkautumisen ja paisumisen helpottamiseksi. Hyväksi kallistukseksi on havaittu 3:1. [8, s.155-156.]

Kanaalilouhinta voidaan jakaa perinteiseen kanaalilouhintaan ja varovaiseen kanaalilouhintaan. Perinteisessä tai tavanomaisessa kanaalilouhinnassa keskireiät ovat reuna-reikien edessä purkautumissuuntaan nähden, noin 1/3 edun verran. Kaikki porareivät panostetaan samalla tavalla. [8, s.155-156.]



Kuva 4. Periaatekuva perinteisestä kanaalilouhinnasta. [13, s.201.]

Kuvassa 4 on periaatekuva kanaalilouhinnasta. Porareiät ovat kallistettuja, ja keskireiät ovat reunareikien edessä.

Varovaisessa kanaalilouhinnassa keski- ja reunareiät porataan samaan riviin. Reunareikien varsipanosta voidaan pienentää, ja keskireikien suurentaa. Tällä pyritään vähentämään ryöstöjä. Suurempi panostus keskirei'issä kuitenkin nostaa tärinä-arvoja. Perinteisessä kanaalilouhinnassa panostus on samanlainen kaikissa rei'issä, jolloin tärinät ovat pienemmät verrattuna varovaiseen kanaalilouhintaan. Perinteisessä kanaalilouhinnassa ryöstöt ovat suuremmat verrattuna varovaiseen kanaalilouhintaan. [8, s.155-156.]

### 2.3 Tarkkuuslouhinta

Tarkkuuslouhinnasta puhutaan, kun louhintatyön lopputulokselle on asetettu tietyt raja-arvot, eli toleranssit. Tarkoituksena on louhia tarkasti tietty määrä tietystä paikasta, ja jättää kallion pinnat rakoilemattomiksi. Tarkkuuslouhintaa tehdään muun muassa tunneleissa ja asutuskeskuslouhinnoissa. Tunneleissa on usein määritelty raja-arvot, minkä verran louhinnan jälkeinen pinta saa poiketa suunnitelmista. Asutuskeskuslouhinnoissa voi olla ahtaita paikkoja tai perustuksia lähellä, jolloin tarvitaan tarkkaa louhintaa. Tarkkuuslouhinta vaatii tarkkaa porausta varsinkin räjäytyskentän reunarei'issä. Tämän takia tarkkuuslouhinta on yleensä kalliimpaa, kuin louhinta missä ei ole sen tarkempia toleransseja, vaan tarkoitus on ainoastaan louhia kivi irti alueelta. Tarkkuuslouhinnassa tärkeintä on reunareikien tarkka poraus, kevyt panostus, ja lähes yhdenaikainen tai 1-2 ms viiveellä tapahtuva sytytys. [8 s.261-282.]

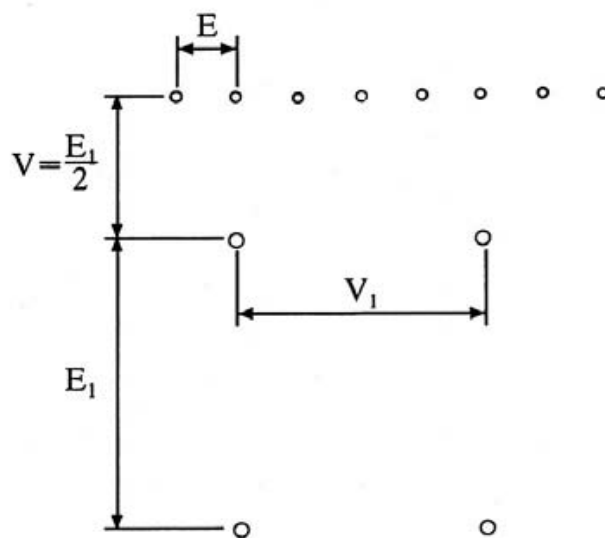


Tarkkuuslouhinta voidaan jakaa esimerkiksi raonräjäytykseen ja jälkilouhintaan. Raonräjäytyksessä halutun louhintarajan kohdalle porataan rakoreiät, jotka porataan tiheämpään riviin kuin varsinainen kenttä, ja panostetaan kevyemmin. Tarkoitus on, että kun rakoreiät räjäytetään samanaikaisesti, tai lähes samanaikaisesti, ne synnyttävät paineaaltoja rakoreikien välillä, jotka aiheuttavat halkeamia tai rakoja rakoreikien välillä. Nämä syntyneet halkeamat ja raot suojelevat jäljelle jäänyttä kalliota varsinaiselta irrotuslouhinnalta. Rako voidaan räjäyttää ennen varsinaisen kentän poraamista ja panostamista, tai yhtäaikaaisesti varsinaisen kentän kanssa. [8 s.269-282.]

Jälkilouhinnassa jätetään niin sanottu jälkilouhintapatja varsinaisen räjäytyskentän, ja suunnitellun louhintarajan väliin. Varsinaisen irrotuslouhinnan jälkeen, tämä louhintapatja porataan ja panostetaan samoin periaattein kuin raonräjäytyksessä. Eli reunareiät porataan tiheään riviin ja panostetaan kevyesti. [8 s.261-282.]

### 2.3.1 Rakolinja menetelmä

Rakolinjaporausmenetelmä on yksi tarkkuuslouhinnan työmenetelmä. Rakolinjaa käytetään esimerkiksi rakennusten tai ratojen välittömässä läheisyydessä. Rakolinjan idea on samankaltainen kuin muussakin tarkkuuslouhinnassa, eli se on tiheään porattu reikäriivi kentän reunalla. Rakolinjan reikäkoko on yleensä 51-76 mm, ja reikäväli 10-30 cm. Rakolinjassa panostetaan joka reikä, tai joka toinen reikä kevyesti verrattuna muihin kentän reikiin. [8, s.274-275.]



Kuva 5. Esimerkki kuva rakolinjamenetelmässä käytetystä reikäasettelusta [13, s.191.]

Rakolinjaa käytettäessä rakolinjaa lähimpänä olevat reiät sijoitetaan muusta kentästä poiketen lähemmäksi rakolinjaa. Etäisyys on yleensä noin puolet varsinaisen kentän reikävälisestä, kuten kuva 5 esittää. Tavoitteena tässä työtavassa on se, että räjäytyksessä kallio irtoaisi rakolinjaa pitkin ja lopputulos olisi siistimpi ja hallitumpi. [8, s.274-275.]

## 2.4 Kalusto

Louhinnassa käytettävä porauskalusto voidaan jakaa esimerkiksi porausmenetelmän perusteella. Porausmenetelmiä ovat päältälyötävä, uppo-, ja kiertoporaus. Päältälyötävässä iskuporauksessa porakoneen energia välittyy porakruunuun poratankojen kautta. Porattavien reikien syvyys määrää sen, kuinka monta tankoa porari tarvitsee. Yleisimmin käytetyissä poravaunuissa on kangenkäsittelylaitteet, joilla porari voi liittää tankoja peräkkäin saavuttaakseen halutun syvyyden. Uppoporaus ero päältälyövästä porauksesta on se, että uppoporauksessa porakoneen mäntä iskee suoraan porakruunuun. Päältälyövässä porauksessa jokainen liitos poratangoissa aiheuttaa noin 6 – 10% vaimennuksen iskuaalloissa. Uppoporauksessa tältä häviöltä vältytään. Kiertoporauksessa käytetään myöskin samaan aikaan alaspäin kohdistuvaa työntövoimaa ja pyöritystä. Työntövoiman tuottamisessa käytetään apuna koneen omaa painoa. Kiertoporauskalusto on suurempaa ja painavampaa muihin menetelmiin verrattuna. Myös poratangon päässä oleva kruunu on isompi kuin muissa menetelmissä. Kiertoporauksella porataan kaikista menetelmistä isoimpia reikiä. Näistä menetelmistä Suomessa käytetään selvästi eniten päältälyötävää porausta. [9, s.137-143.]

Toinen tapa jakaa kalustoa on työkohteen mukaan, maanalaiseen kalustoon ja maanpäälliseen kalustoon. Työn luonteesta johtuen maan alla käytettävältä kalustolta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia, kuin maanpäällä käytettävältä kalustolta. Kalustoa voidaan käyttää ristiin, esimerkiksi yleensä maanalaisessa louhinnassa käytettävää ns. jumboa voidaan käyttää yhtä hyvin maanpäällä avolouhinnassa vaakareikien poraamiseen. [8, 129.]



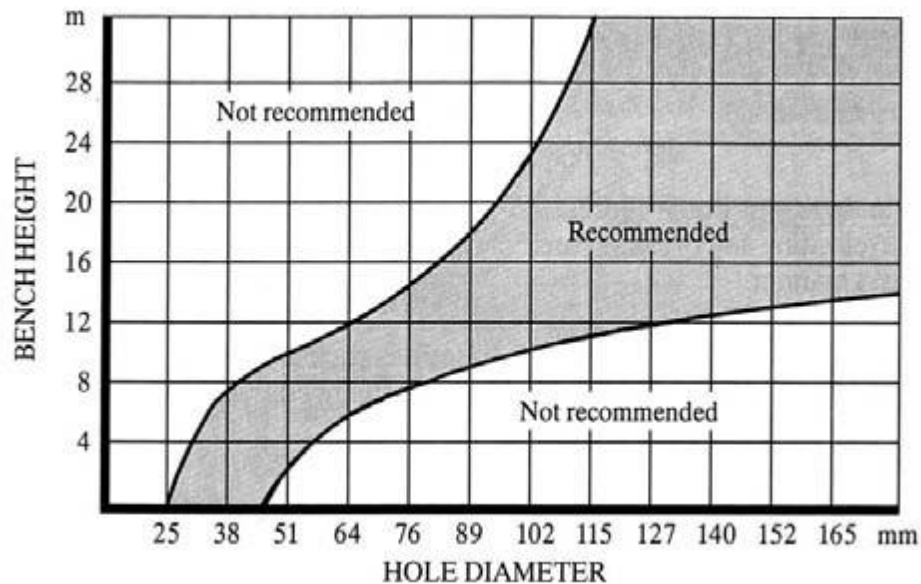
Kuva 6. Sandvik DX780 hytillinen poravaunu. [15.]

Kuvan 6 poravaunu on Suomessa yleisesti käytetty kone kallionporaukseen. Se kuuluu keskiraskaaseen sarjaan. Louhinnassa käytettävät poravaunut voidaan jakaa kokonsa puolesta kevyisiin, keskiraskaisiin ja raskaisiin yksiköihin. Kevyet poravaunut ovat usein kauko-ohjattavia, joko pyörillä tai teloilla liikkuvia. Niitä käytetään, kun porataan matalia penkereitä ja alle 45 mm reikiä. Kevyet poravaunut soveltuvat myös hankalasti liikuttaviin kohteisiin, missä isommalla vaunulla on vaikea toimia. [8, s.132-133.]

Keskiraskailla vaunuilla porataan yleensä 45 mm – 115 mm reikäkoolla 5-25 m penkereitä. Keskiraskaita vaunuja käytetään sekä matalissa tasauslouhinnoissa, että isommissa louhinnoissa esimerkiksi murskaamoilla. Raskailla poravaunuilla porataan yleensä 76-203 mm reikää suuren volyymin kohteissa, kuten avokaivoksilla. [8, s.132-133.]

Kaluston valinta tehdään irrotettavan kivimäärän, kallion laadun, pengerkorkeuden ja reikäläpimitan perusteella. Yksi mahdollinen porauskaluston valintaa rajoittava tekijä on myös louhintaa suorittavan yrityksen käytettävissä oleva kalusto. Isommat kohteet kivimäärän ja pengerkorkeuden perusteella porataan usein isommalla kalustolla ja suuremalla reikäkoolla. Runsas- ja tiheärakoisessa kalliossa suositellaan myös käytettäväksi isompaa reikäkokoa reikien tukkeutumisvaaran takia. Pienemmissä kohteissa, missä

louhittava kivimäärä on vähäisempi ja penkereet ovat matalia, on yleensä taloudellisempaa käyttää pienempää reikäkokoa ja sitä kautta kevyempää kalustoa. Pienempi reikäkoko tulee kyseeseen myös silloin, jos on kyse tarkkuuslouhinnasta ja lopputulokselle on asetettu tiukat vaatimukset. [8, s.139-140.]



Kuva 7. Suositeltavat reikäkoot eri pengerkorkeuksilla [13, s.143.]

Kuva 7 antaa käsityksen reikäkoon ja pengerkorkeuden yhteydestä. Kaikki kohteet eivät noudata kuvan suositusta, mutta se toimii hyvänä pohjana. Yleisimpiä reikäkokoja ovat 76 mm ja 89 mm. Reikäkoko, etu ja reikäväli ovat toisistaan riippuvaisia. Pienempi reikäkoko vaatii pienemmän edun ja reikävälin, ja suurempi reikäkoko mahdollistaa edun ja reikävälin kasvattamisen. Isoissa tuotantolouhoksissa käytetään isompia reikäkokoja, koska silloin etua ja reikäväliä voidaan kasvattaa, ja irrotusteho paranee. Asutuskeskuslouhinnoissa on usein tärinärajoituksia, eli kerralla räjähtävän räjähdeainemäärän täytyy olla tarpeeksi pieni. Tällöin käytetään pienempää reikäkokoa, ja pienempää etua ja reikäväliä.

## 2.5 Räjähteet

Louhinnassa käytettävät räjähteet voidaan luokitella nitroglyseroli-, Anfo-, vesigeeli- ja emulsioräjähdeaineisiin. Räjähdetuotanto on paljon säädelty ala, millä ei ole paljoa kilpailua. Valtaosan Suomessa käytetyistä räjähdeaineista tuottaa ja toimittaa Oy Forcit

Ab. Tässä luvussa käydään läpi yleisimmät avolouhintatöissä käytettävät räjähteet, joita Forcit tuottaa. [8, s.58-59.]

Nitroglyseroli-räjähdysaineet eli dynamiitit sisältävät pääaineinaan nitroglyserolia ja/tai nitroglykolia sekä ammoniumnitraattia. Forcit valmistaa tavanomaista irrotusdynamiittia Fordyn-tuotenimellä. Fordyn soveltuu kaikenlaisiin louhintatöihin normaaleissa olosuhteissa. Dynamiitit ovat yleensä helposti muovaittavia, ja niitä voi paloittaa panosmäärän hallitsemiseksi. Fordyn-dynamiittia käytetään varsinkin asutuskeskuslouhinnoissa pohjapanoksena esimerkiksi Kemix A:lle, tai pienemmissä tasauslouhinnoissa ilman varsi-panosta. Fordynin räjähdysnopeus on 2500 – 6000 m/s. Se vaihtelee patruunakoon mukaan. [8, s.60.]

Toinen yleinen dynamiitti avolouhintapuolella on erikoisdynamiitti Redex. Siihen on lisätty heksogeenia, jonka vuoksi Redexin räjähdysnopeus on tavanomaista dynamiittia suurempi. Korkean räjähdysnopeutensa takia Redexiä käytetään varsinkin epäherkkien räjähdysaineiden aloitepanoksena. Epäherkkiä räjähdysaineita ovat slurrit, emulsiot ja Anfo. Redexiä käytetään myös pintapanoksena edesauttamaan kannen lohkaroitumista. Redexin räjähdysnopeus on 6900 – 7200 m/s. [8, s.61.]

Kemix A on patruunoitu emulsioräjähe. Sillä on hyvä vedenkestävyys, eikä se liukene veteen. Kemix A:han on lisätty alumiinia sen räjähdysenergian lisäämiseksi. Kemix A:ta käytetään esimerkiksi varsi-panoksena asutuskeskuslouhinnoissa, tai kivimurskaamoilla pohjapanoksena Anfolle ja Kemiitille. Kemix A:n räjähdysnopeus on 4600 – 5600 m/s.

Anfo on rakeinen räjähdysaine, joka perustuu ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seokseen. Sitä pidetään yleisesti halvimpana räjähdysaineena. Anfot panostetaan reikiin joko paineilmapanostuslaitteella, tai kaatamalla suoraan säkistä reikään. Anfot vaativat pohjapanokseksi esimerkiksi Redexiä tai Kemix A:ta. Anfon huonopuoli on se, että se ei ole vedenkestävää. Forcit valmistaa kuitenkin Ahti-Anfoa, mitä voidaan käyttää kosteisiin reikiin, kunhan vesi on puhallettu pois ennen panostustyötä. Anfojen räjähdysnopeus on 3000 – 3500 m/s. [8, s.64.]

Bulkemulsioräjähteet ovat ympäristöystävällisiä, turvallisia, ja tarpeen mukaan muokattavia räjähteitä. Forcit myy avolouhinnassa käytettäviä bulkemulsioita Kemiitti-tuotenimellä. Kemiitti 510 ja Kemiitti 610 ovat avolouhinnoissa käytettäviä räjähteitä. Kemiitit toimitetaan työmaille erillisellä Kemiitti-autolla, josta ne pumpataan suoraan reikiin.

Kemiittien etuna on vedenkestävyys, nopeutunut panostustyö, ympäristöystävällisyys, räjähteiden varastointitarpeen pieneneminen työkohteessa, ja korkea panostusaste. Korkean panostusasteen vuoksi ruutukoko on usein isompi Kemiitillä panostettaessa, verrattuna esimerkiksi Anfollla panostamiseen. Kemiittien räjähdysnopeus on 4200 – 5500 m/s, ja ne vaativat aloitepanokseksi esimerkiksi Redexiä. [8, s.63.]

## 2.6 Louhintaan liittyvä lainsäädäntö

Räjäytystöihin liittyy useita lakeja ja asetuksia, mikä on ymmärrettävää ottaen huomioon töiden luonteen. Louhintatöihin liittyy seuraavia lakeja ja asetuksia:

- Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatöiden turvallisuudesta (644/2011)
- Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta (390/2005)
- Valtioneuvoston asetus räjähteiden valmistuksen ja varastoinnin valvonnasta (819/2015)
- Panostajalaki (423/2016).

Tärkein louhintatöihin liittyvistä asetuksista on *Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatöiden turvallisuudesta 644/2011*. Siinä säädetään louhintatöiden suunnittelusta, toteutuksesta, pätevyyksistä ja räjähteiden säilyttämisestä työpaikalla. Lain mukaan louhintatöistä on tehtävä turvallisuus- ja räjäytyssuunnitelmat. Laissa määritellään myös tarkasti mitä asutulla alueella tarkoitetaan.

*”Asutulla alueella tarkoitetaan aluetta, joka ulottuu 200 metrin etäisyydelle asutusta rakennuksesta tai paikasta, jossa ihmisiä tavallisesti oleskelee. Maanalainen louhintakohde, joka on 100 metriä lähempänä sinne johtavan tunnelin suuaukkoa, on asutulla alueella, jos tunnelin suuaukko on asutulla alueella. Muu maanalainen louhintakohde on asutulla alueella, jos siitä etäisyys asuttuun rakennukseen tai paikkaan, jossa ihmisiä tavallisesti oleskelee, on alle 50 metriä.”*

Laissa säädetään, että asutulla alueella työskennellessä räjäytyskentät on peitettävä, ja räjähdeaineena tulee käyttää patruunoituja räjähteitä tai vastaavan turvallisuuden takavaa räjähdettä. Asutulla alueella louhittaessa saa räjäyttää kerrallaan yhden panoksen, jonka räjähdeainemäärä on rajoitettu seuraavasti:

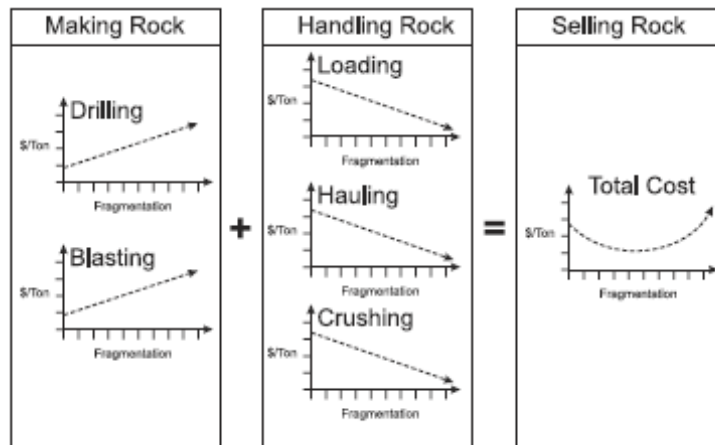
Yhtenä panoksena räjäytettävä räjähdemäärä (kg)	Etäisyys (m) asutusta rakennuksesta tai paikasta, jossa ihmisiä tavallisesti oleskelee
0,06	10
0,12	20
0,25	40
0,50	80
1,0	160
[16.]	

Räjähteiden säilytyksestä säädetään seuraavasti: *”Työpaikalla saa varastosuojan ulkopuolella olla asianmukaisesti sijoitettuna, merkittynä ja vartioituna enintään räjäytyssuunnitelman mukaista päivän tarvetta vastaava määrä räjähdettä.”* [16.] Louhintatyön voi tehdä esimerkiksi niin, että aamuksi tilataan päivän tarvetta vastaava määrä räjähteitä ja iltapäivällä töiden loputtua mahdollisille ylimääräisille räjähteille tilataan haku pois.

*Panostajalaki (423/2016)* käy läpi tarkemmin, mitä panostajan pätevyys vaatii ja miten pätevyudet haetaan ja uusitaan. *Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta (390/2005)* käsittelee tarkemmin *”räjähteille asetettavista vaatimuksista sekä räjähteiden valmistuksesta, maahantuonnista, käytöstä, siirrosta, kaupasta, luovutuksesta, hallussapidosta, varastoinnista, säilytyksestä ja hävittämisestä,”* [17.]

### 3 Lohkarekoko

Tässä luvussa käydään läpi kiven lohkaroitumista, louheen lohkarekoko ja lohkarekoon hallintaa avolouhinnassa. Erilaiset louhintakohteet asettavat lohkarekoolle erilaisia vaatimuksia. Jokaisessa kohteessa yritetään löytää mahdollisimman taloudellinen lopputulos.



Kuva 8. Kustannusten optimointi [13, s.141.]

Kuvassa 8 vasemmalla on kuvattu irrotus, eli poraus ja panostus, keskellä lastaus, kuljetus ja mahdollinen murskaus. Oikealla on kokonaiskustannukset. Isommalla porareiällä ja isommalla ruutukoolla sekä poraus, että panostuskustannukset laskevat. Samoin loh-karekoko kasvaa. Kasvanut loh-karekoko toisaalta lisää irrotuksen jälkeisiä lastaus, kuljetus ja murskauskustannuksia. Lopputuloksena on näiden tasapainon löytäminen ja kustannusten optimointi.

Avolouhintatöissä työkustannusten osuus on luokkaa 75-80% kokonaiskustannuksista. Nämä välittömät työkustannukset jakautuvat seuraavasti:

<i>Työvaihe</i>	<i>%-osuus työkustannuksista</i>
<i>Poraus</i>	10 – 25
<i>Panostus</i>	10 – 20
<i>Kuormaus</i>	15 – 20
<i>Kuljetus</i>	20 – 40

[8, s.179.]



Eri vaiheiden kustannukset vaihtelevat kohteesta toiseen, ja riippuvat siitä, louhitaanko asutuskeskusalueella vai ei, ja millaista lohkar kokoa tavoitellaan.

Lohkarekoon optimointi tulee kyseeseen varsinkin kaivos- ja murskaus toiminnassa, missä louhittavat kivimäärät ovat isoja verrattuna asutuskeskuslouhintaan. Tietyille murskaimille on olemassa optimaaliset lohkar koot, ja jos louhittaessa päästään lähelle tätä ennalta määritettyä lohkar kokoa, pienentää se koko prosessin kustannuksia. [10, s.3.]

Lohkarekoon optimoinnista on hyötyä myös esimerkiksi louhittaessa rakennusten pohjia. Tällöin työn suunnittelun lähtökohtana ei välttämättä ole tietty lohkar koko, vaan tasa-laatuinen rakeisuuskäyrä, missä ei ole liikaa ylisuuria lohkareita, ja mikä on tarvittaessa helppo lastata ja kuljettaa pois. Kiven kuljettaminen pois maksaa, mikä tarkoittaa, että usein tavoitteena on käyttää irrotettuja kiviaineksia samassa kohteessa mahdollisuuksien mukaan.

### 3.1 Kallion ja räjähdysaineen vaikutus

Kallion räjäytyksessä ensivaiheen paine saa aikaan kiven murskautumisen noin 1 – 5 kertaa porausreiän säteen suuruisella alueella. Samaan aikaan porareian ympärille lähtee leviämään värinäaalto noin 3000 – 6000 m/s nopeudella. Värinäaalto aiheuttaa kalliossa puristusjännitystä. Vapaaseen pintaan saapuessa värinäaalto heijastuu ja muuttuu samalla vetojännitykseksi. Kallio alkaa rikkoutua, kun sen vetojännitystila ylittyy. Räjähdyksessä syntyvät räjähdyskaasut laajenevat ja tunkeutuvat syntyneisiin rakoihin, ja laajentavat niitä edelleen. Kivi alkaa liikkua vapaata pintaa kohti, ja irtoa täysin samalla kun paine laskee. [8, s. 101.]

Kallion geologiset ominaisuudet vaikuttavat lohkar kokoon enemmän, kuin esimerkiksi käytettävä räjähdysaine. Lohkarekoon kannalta oleelliset kallion ominaisuudet ovat veto- ja puristuslujuus, tiheys, aaltoliikkeen etenemisnopeus, kallion kovuus ja rakenteelliset ominaisuudet. [8, s.110.]

Pehmeät kivet, kuten pehmeä hiekkakivi, ovat anteeksi antavampia kuin kovat kivet, kuten graniitti. Anteeksi antavuudella tarkoitetaan sitä, että pehmeä kivi on useimmiten

vielä kuormattavissa, vaikka ominaispanostus olisi jäänyt liian pieneksi. Pehmeissä kivissä liian suuri ominaispanostus ei myöskään aiheuta yleensä vaarallista heittoa. Kovissa kivissä liian pieni ominaispanostus tai syttymisaikaväli vaikeuttaa kuormattavuutta, ja saattaa aiheuttaa kivien sinkoilun reikien suulta ja kynsien jäämistä. [8, s.110.]

Kenttäkokeissa on osoitettu, että kovissa kivilajeissa rikkoutuminen tapahtuu parhaiten nopeilla räjähdysaineilla, ja pehmeissä kivilajeissa hitailla räjähdysaineilla. Nopeita räjähdysaineita on esimerkiksi Redex ja Kemix A. Hitaita räjähdysaineita ovat esimerkiksi tarkkuuslouhinnassa käytettävät putkipanokset. [8, s.110.]

Porauksen suunta rakojen suhteen vaikuttavaa merkittävästi räjäytyksen lopputulokseen. Kallion rakoilun ja liuskeisuuden tunteminen edesauttaa onnistuneen räjäytystyön suunnittelussa. Mikäli kalliossa on paljon rakoja, niihin katoaa suuri osa räjähdysenergiasta eikä kallio välttämättä rikkoudu kuten haluttaisiin. Tämän tapahtumista voidaan parhaiten ehkäistä pienentämällä reikäkokoa, ja tihentämällä porauskaaviota. Tämä edesauttaa räjähdysaineen jakautumista tasaisemmin kallioon. Ominaispanostusta voidaan myös nostaa, mutta se lisää vaarallisen heiton riskiä. [8, s.110.]

Yleensä louhintatöissä suurimmat lohkarieet syntyvät porareian yläosan kohdalla, missä on etutäyte. Tämä tapahtuu erityisesti vaakarakoilleessa kalliossa. Lohkarekokoa saadaan pienemmäksi porareian yläosan kohdalta lyhentämällä etutäytettä. Tämä kuitenkin lisää kivien sinkoutumisvaaraa, jos räjähdysenergia ei pääse purkautumaan muualle kuin taivasta kohti. Yksi tapa on myös porata ja panostaa apureikiä varsinaisten reikien väliin. Apureikiä käytetään esimerkiksi silloin, kun räjäytettävässä kentässä sijaitsee vaakarako lähellä pintaa. Ilman apureikiä kansi tulisi jäämään isoiksi lohkarieiksi. [8, s.110.]

### 3.2 Porauksen vaikutus

Suomessa louhinnassa käytetään reikäkokoja välillä 30 mm – 203 mm. Porareian suuruus, pengerkorkeus ja reikäsyvyys vaikuttavat siihen, millaisella kalustolla poraustyö tehdään. Edellä mainitut tekijät vaikuttavat myös edun ja reikävälin määrittelyyn. Suuri porareikä kasvattaa etua ja reikäväliä, ja sen kautta pienentää porauskustannuksia kuutiota kohti. Edun ja reikävälin kasvaessa kasvaa mahdollisuus siihen, että kallio rikkoutuu

sen geologisia heikkouspintoja pitkin, eikä niin kuin suunniteltiin. Tämä johtaa lohkekoon ja ylisuurien lohkeiden määrän kasvuun, ja lisää kuljetus- ja rikotuskustannuksia. [8, s.111.]

Reikävälin (E) ja edun (V) määrittely on aina tapauskohtaista. Kovassa kalliossa pienimpään lohkekokoon on todettu päästävän E/V suhteella 1,25. [8, s.111.]

Porareikien kallistus pienentää käytännön etua, kasvattaa reiän pohjalla vapaata purkautumiskulmaa ja sitä kautta pienentää kallion jännitystä reiän pohjalla. Yleensä porareikiä kallistetaan niin, että iskuaalto kohdistuu penkereen vapaaseen pintaan. Eli mitä pystysuorempi penkereen vapaa pinta on, sitä lähempänä porareikien kallistus on pystysuoraa. Kallistetuilla rei'illä päästään varmemmin haluttuun pohjatasoon, ja lohkaroituminen kentän yläosassa paranee. Tavanomainen kallistus porarei'ille on 3:1. Kun porareikiä kallistetaan, kasvaa virheporauksen riski sitä mukaan mitä syvemmät porareiät ovat. Muutaman sentin virhe kentän pinnalla on jo moninkertaistunut syvän reiän pohjalla. Tämänlaiset porausvirheet tekevät kentän edusta ja reikävälistä epäsäännöllisiä, mikä aiheuttaa lohkekoon epäsäännöllisyyttä, ja isojen lohkeiden määrää. Pitkissä monen kymmenen metrien porarei'issä poikkeamat porareikien kiertymisestä johtuen saattavat olla useita metrejä. Tämä saattaa johtaa porareikien ristiin kiertymiseen, ja sitä kautta väärään sytytysjärjestykseen. Väärä sytytysjärjestys ei anna kivelle tilaa laajeta, ja lopputuloksena saattaa kiviä sinkoilla hallitsemattomasti pitkänkin matkan päähän räjäytyksestä. [8, s.113, 12.]

Kallistuksien ja reikien suoruuden mittaaminen paranee koko ajan koneohjauksen kehityessä. Nykyajan poravaunut ovat kytkettynä verkkoon, ja lähettävät esimerkiksi työmaainsinöörin tietokoneelle tarkat tiedot porauksesta. Louhintatöiden suunnitteluun tarkoitettuilla tietokoneohjelmilla voidaan piirtää 3D-malleja poravaunun keräämän tiedon perusteella.

### 3.3 Panostuksen vaikutus

Lohkaroitumisen kannalta tärkeimmät räjähdysaineen ominaisuudet ovat panostusaste, räjähdysnopeus, räjähdyslämpö ja kaasutilavuus. Näiden suureneminen tuottaa enem-

män energiaa kallion rikkomiseen. Lohkaroitumista ajatellen Kemiitti on hyvä räjähdettäine. Reiän pohjaosassa oleva Kemiitti on tiheämpää kuin lähempänä pintaa oleva. Suurempi tiheys kasvattaa panostusastetta, ja näin edesauttaa lohkaroitumista. [13, s.168.]

Lohkaroitumiseen vaikuttaa myös ominaispanostus ja se, miten räjähdettäine on sijoiteltu kallioon. Räjähdettäineen sijoittamiseen vaikuttaa kallion rikkonaisuus. Mikäli kalliossa on paljon rakoja, tai muu selkeä heikkousvyöhyke, katoaa niihin räjähdysenergiaa sen sijaan, että se rikkoisi kiveä. Emulsiolla panostettaessa itse räjähdettäinettä voi joutua kallion rakoihin, jolloin se ei ole sijoittunut kallioon suunnitellusti. Lopputuloksena saattaa olla hallitsematon räjähdys. Lohkaroitumisen kannalta optimaalisinta olisi pitää ruutukoko pienenä, jolloin räjähdettäine on jakautunut tasaisemmin kallioon. [8, s.110-111.]

Etutäyte on tärkeä lohkaroitumisen kannalta. Sen tehtävänä on pitää painetta porareissä pidempään, eikä päästää sitä purkautumaan heti ylöspäin. Etutäytettä voidaan pidentää, tai se voidaan tehdä karkeammasta materiaalista, jolloin sen vaikutus kasvaa. Etutäytteen pidentäminen toisaalta laskee räjähdettäineen määrää reikien yläosassa, jolloin kansi ei lohkaroidu kunnolla. [13, s.169.]

### 3.4 Sytytyksen ja hidastuksen vaikutus

Hidastuksella pyritään mahdollistamaan räjähdysten tapahtuminen hallitusti. Jos räjäytyskentän kaikki reiät räjäytettäisiin samaan aikaan, olisi kiven purkautuminen ja heitto hallitsematonta. Hidastuksen idea on räjäyttää yksittäiset reiät tai reikärivit eri aikaan, vapaasta pinnasta kentän perää kohti. Lähimpänä vapaata pintaa olevat reiät räjähtävät ensiksi, ja antavat tilaa seuraaville rei'ille purkaantua hallitusti vapaan pinnan suuntaan. Räjäyttämällä reiät eri aikaan saadaan myös momentaanista, eli kerralla räjähtävää räjähdysainemäärää pienennettyä. Tämä aiheuttaa vähemmän tärinää, mikä on yleensä tärkeää louhittaessa asutuskeskuksissa. [8, s.111-112.]



Kuva 9. Liian lyhyt aikaväli, hallitsematonta sinkoilua. [13, s.161.]

Liian lyhyt aikaväli reikärivien välillä aiheuttaa kynsiä pohjalla, ja hallitsematonta kivien sinkoilua reikien suulta. Aikaväli reikärivien välillä voi olla myös liian pitkä, mikä voi aiheuttaa vaarallista heittoa eteenpäin. Kun aikaväli reikärivien välillä on sopiva, toimii edellinen reikärivi "suojapeitteenä" seuraavalle reikäriville. Sopiva aikaväli on aina tapauskohtainen, mutta ohjeellinen aikaväli on peräkkäisissä rei'issä 13-25 ms per metri etua ja vierekkäisissä rei'issä 5-10 ms per metri etua. [8, s.112.]



Kuva 10. Sopiva aikaväli reikärivien välillä. [13, s.161.]

Langerforsin kaava antaa parhaan käsityksen hidastuksesta, kun tarkastellaan pelkkää pientä lohkarekokoa. Se perustuu käytännön kokemukseen ja vuosien mittaan tehtyihin koeräjäytyksiin.

Kaava on seuraavanlainen [8, s.112]:

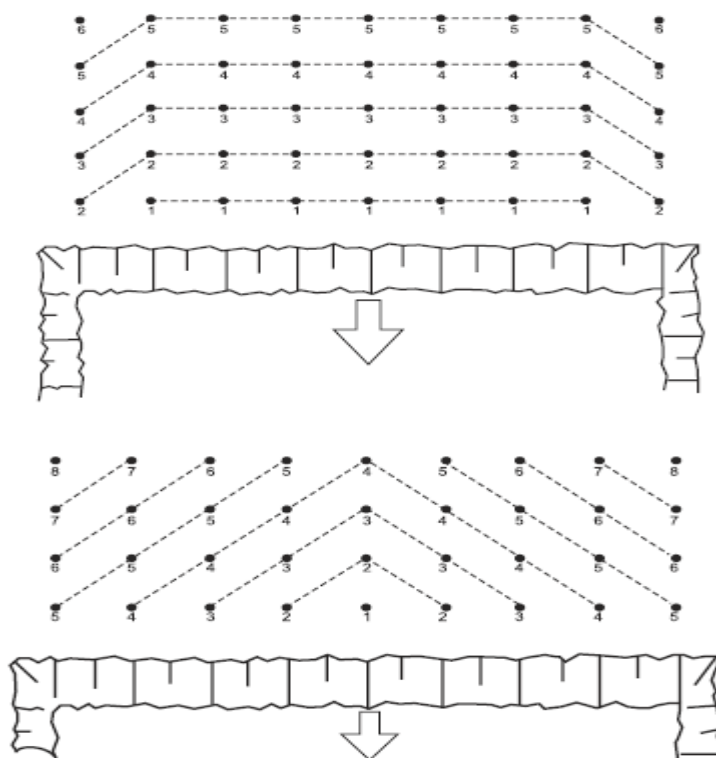
$$T = \tau \times V$$

$T$  = hidasteaikaväli ms

$\tau$  = kerroin 3-5 ms/m etua

$V$  = etu (m)

Langerforsin kaavan antama 3-5 ms per metri etua on selvästi ohjeellista arvoa pienempi. Ohjeellinen hidasteaika peräkkäisissä rei'issä on 13 – 25 ms/m etua, ja vierekkäisissä 5-10 ms/m etua. Tällä 3-5 ms per metri etua on reikien todettu räjähtävän silloin, kun edellä räjähtäneen reiän aiheuttama värähtely on seuraavan reiän kohdalla suurimmillaan. Näin pienet aikavälit edellyttävät elektronisten nallien käyttöä. Langerforsin kaavan antamia pieniä aikavälejä käytetään lähinnä suurilla tuotantolouhoksilla, ja varsinkin pehmeämmissä ”anteeksi antavammissa” kallioissa. 3-5 ms per metri etua aikaväillä kivi ei ehdi liikkua paljoa eteenpäin, mikä varsinkin kovissa kallioissa kasvattaa riskiä hallitsemattomaan sinkoiluun ja kynsien syntymiseen. Asutuskeskus louhinnoissa näin lyhyet aikavälit eivät tule kysymykseen. [8, s.112.]



Kuva 11. Kaksi esimerkkiä kytkentäkaavioista [13, s.162.]

Kuvassa 11 on esitetty kaksi mahdollista kytkentäkaaviota. Numerot kuvaavat reikien syttymisjärjestystä. Ensimmäinen kuva esittää yksinkertaista kaaviota, missä joka reikävivillä on yksi hidasteaika, lukuun ottamatta reunimmaisista reikiä jotka räjäytetään seuraavan rivin kanssa. Alempi kuva esittää auranmuotoista sytytyskaaviota. Siinä kivi lentää enemmän penkereen keskikohtaa kohti, ja kivet törmäilevät enemmän räjäytyksen aikana. Lopputuloksena on korkeampi ja tiiviimpi kivikasa verrattuna ylempään kaavioon. Alempi auranmuotoinen sytytyskaavio tarjoaa paremman lohkaroitumisen. [13, s.161-162.]

### 3.5 Lohkarekoon arviointi ja hallinta

Lohkarekokoa louhinnassa voidaan arvioida monella eri tapaa työn suunnittelu vaiheessa. Apuna voidaan käyttää taulukoita, jotka perustuvat käytännön kokemukseen, tietokone ohjelmia kuten Blastec, tai yhtälöitä jotka myöskin perustuvat käytännön kokemukseen. Lohkarekokoa voidaan arvioida silmämääräisesti louhinnan jälkeen, katsoamalla räjäytystyön jälkeen, missä kohtaa isoimmat lohkarit sijaitsevat, ja kuinka paljon niitä on. Silmämääräinen arviointi räjäytyksen jälkeen antaa jo hyvän kuvan siitä, kuinka työssä onnistuttiin. Tarkempaa tutkimusta varten voidaan syntyneestä kiviaineksesta tehdä rakeisuuskäyrä, josta saadaan tarkempaa tietoa kiviaineksesta.

Lohkarekoon ennalta arviointiin on kehitetty monenlaisia yhtälöitä vuosien varrella. Näitä ovat esimerkiksi Kuznetsovin yhtälö, SveDeFo yhtälöt, Kuz-Ram malli ja Stiftelsen Svensk Detonikforskning:n (Ruotsin räjähdystutkimussäätiö) yhtälö. Näille kaikille malleille on yhteistä se, että niissä ei käsitellä hidastuksen vaikutusta lopputulokseen. Sen sijaan niissä käsitellään usein vain porauskaaviota, eli räjähdeseineen sijoittumista kallioon. Lohkarekoon arviointiin käytettävistä malleista saadaan usein vastaukseksi  $S_{50}$  silmäkoko.  $S_{50}$  tarkoittaa sitä seulakokoa, minkä 50% räjäytetyn kentän lohkarista läpäisisi, jos ne seulottaisiin. [10 & 14, s. 145.]

Ruotsin räjähdetutkimussäätiön kehittämä yhtälö on yksinkertaisin lohkarekoon arviointiin kehitetty yhtälö. Yhtälö on:

$$\ln * L = \ln 0,29 * VV_{12} - \ln 1,18(q-c) - 0,82$$

missä  $L$  = Keskimääräinen lohkarikoko, eli  $S_{50}$  silmäkoon mukainen lohkarikoko

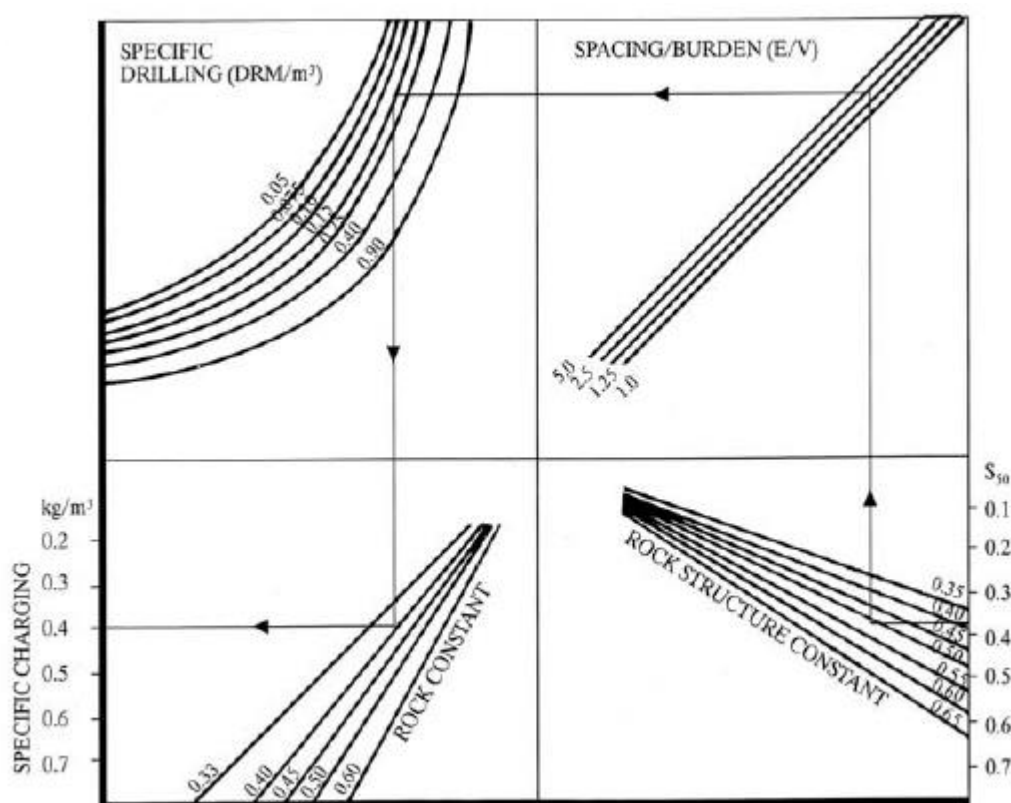
$V = E_{tu} \text{ (m)}$

$V_{12} = E_{tu} \text{ (m)}$ , kun  $E_{tu}/\text{Reikäväli} = 1$

$q = \text{Ominaispanostus (kg/m}^3\text{)}$

$c = \text{Räjätettävyyssvakio (Saa arvon 0,4 – 0,6. Harvarakoinen kivi saa arvon 0,4 ja tiheärakoinen kallio saa arvon 0,6).}$

[13, s.172.]



Kuva 12. Nomogrammi Ruotsin räjähdetutkimussäätiön kehittämästä yhtälöstä. [13, s.172.]

Ruotsin räjähdetutkimussäätiön kehittämästä yhtälöstä on tehty nomogrammi helpottamaan sen käyttöä. Nomogrammi auttaa ymmärtämään, miten eri tekijät vaikuttavat keskimääräiseen lohkarekokoon. Nomogrammista voidaan tulkita esimerkiksi, että haluttaessa pienempi keskimääräinen lohkarekoko, kasvaa ominaisporaus sekä ominaispanostus.

Yksi ensimmäisiä lohkarekoon arviointiin kehitettyjä yhtälöitä oli Kuznetsovin 1970-luvulla tekemä seuraava yhtälö, jota Cunningham päivitti 1980-luvulla:



$$x = A * (V/Q)^{0,8} * Q^{0,17} * (E/115)^{-0,63}$$

missä  $x$  = Keskimääräinen lohkokoko (cm)  
 $A$  = Kivivakio, 7 vähemmän lujille kiville, 10 lujille ja rikkonaisille kiville, 13 lujille vähän rikkonaisille kiville  
 $V$  = Etu \* reikäväli \* pengerkorkeus  
 $Q$  = Massa kilogrammoina TNT:tä, mikä vastaa yhdessä reiässä olevan räjähdelainemäärän energiaa TNT:nä  
 $E$  = Räjähdelaineen suhteellinen voima, ANFolla esimerkiksi 100.

[14, s.146-147.]

Tätä yhtälöä kehitettiin eteenpäin, jotta voitiin arvioida louheen lohkokokoa tarkemmin kuin pelkän keskimääräisen lohkokoon avulla. Haluttiin saada tietoa hienoaineksen määrästä, ylisuurten lohkokoiden määrästä, eli louheen tasalaatuisuudesta. Lohkokokoa käsittelevissä yhtälöissä tasalaatuisuudesta kuvataan usein kirjaimella  $n$ . Yleensä suuremmat  $n$ :n arvot tarkoittavat tasalaatuisempaa louhetta. Tämän  $n$ :n arvioimiseen kehitettiin niin sanottu Kuz-Ramin malli. Se voidaan esittää yksinkertaisimmillaan seuraavasti: [14, s.146-147.]

$$n = (2,2 - 1,4 * B/d) * (1 - W/B) * ((1 + (A-1) / 2) * L/H$$

missä  $n$  = Kuvaa louheen tasalaatuisuutta  
 $B$  = Etu (m)  
 $d$  = Reikäkoko (mm)  
 $W$  = Poraustarkkuuden keskimääräinen poikkeama (m)  
 $A$  = Reikäväli/Etu suhde  
 $L$  = Panoksen pituus  
 $H$  = Pengerkorkeus (m).

[14, s.147.]

Kuz-Ramin mallia on päivitetty vuosien mittaan useiden eri tutkijoiden toimesta, ja se on muuttanut hieman muotoaan tutkimuksesta riippuen. Sen perusperiaate on kuitenkin pysynyt samana. Kutznetsovin ja Kuz-Ramin yhtälöistä voidaan päätellä, että lohkokoko

pienenee mitä voimakkaampaa räjähdettä käytetään. Lohkarekokoa pienentää myös tiheämmän räjähdeaineen käyttö, jolloin ominaispanostus kasvaa. Yhtälöistä voidaan myös todeta, että ominaispanostuksen kasvattaminen ruutukokoa pienentämällä pienentää lohkarokokoa, ja tekee louheesta tasalaatuisempaa. Cunningham totesi 1980-luvulla seuraavien tekijöiden tekevän louheesta tasalaatuisempaa:

- Edun suhde reikäkokoan pienenee
- Poraustarkkuus paranee
- Reikäväli / etu suhde nousee
- Panoksen pituus pengerkorkeuteen nähden kasvaa.

[14, s.147-149.]

### 3.5.1 Esimerkkilasku

Kokeillaan edellisen luvun kaavoja käytännön esimerkillä.

Esimerkkikenttä, räjähdeaineena ANFO:

Pengerkorkeus	6m
Reikäläpimitta	64mm
Etu	1,9m
Reikäväli	2,4m
Reikäpanoksen korkeus	4,6m
Reikäpanoksen paino	13,5kg
Ominaispanostus	0,5kg/m <sup>3</sup>
Ominaisporaus	0,256pm/m <sup>3</sup>
Poraustarkkuuden keskimääräinen poikkeama	0,15cm

Oletetaan kalliovakioksi 0,4 ja räjäytettävyyssvakioksi 0,5. Kalliovakio tarkoittaa sitä räjähdeainemäärää joka takaa kallion irtoamisen. Räjäytettävyyssvakiolla ilmaistaan kallion geologista rakennetta. 0,5 tarkoittaa vähäraakoista kalliota. (2 s.113)

Kokeillaan aluksi Ruotsin räjähdetutkimussäätiön kehittämää yhtälöä ja nomogrammia:

$$\ln * L = \ln 0,29 * VV_{12} - \ln 1,18(q-c) - 0,82$$

missä  $L$  = Keskimääräinen lohkokoko, eli  $S_{50}$  silmäkoon mukainen lohkokoko  
 $V$  = Etu (m)  
 $V_{12}$  = Etu (m), kun Etu/Reikäväli = 1  
 $q$  = Ominaispanostus (kg/m<sup>3</sup>)  
 $c$  = Räjätettävyyssvakio (Saa arvon 0,4 – 0,6. Harvarakoinen kivi saa arvon 0,4 ja tiheärakoinen kallio saa arvon 0,6).

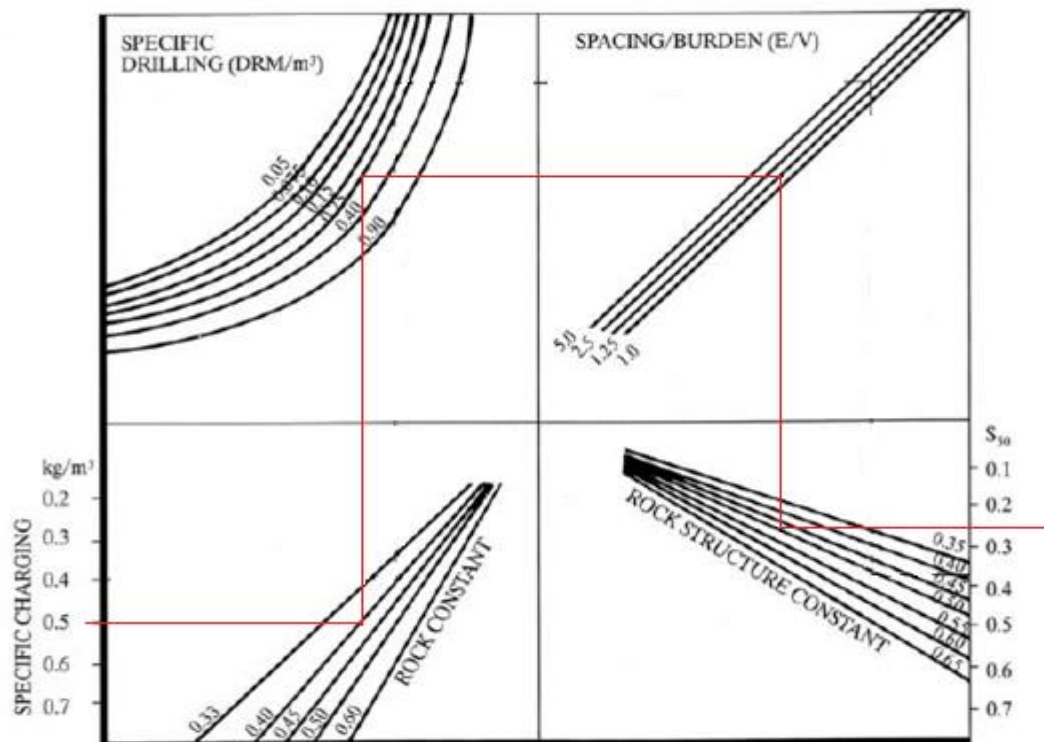
[13, s.172.]

Sijoitetaan:

$$\ln * L = \ln(0,29) * 1,9 - \ln(1,18) * (0,5-0,5) - 0,82$$

$$\ln * L = -2,3519 + 0,82$$

$$L \approx 0,215\text{m}$$



Kuva 13. Esimerkki nomogrammin käytöstä. [13, s.172.]

Kuvassa 13 on esimerkki nomogrammin käytöstä. Ominaispanostuksena on käytetty 0,5 kg/m<sup>3</sup>, kalliovakiona 0,4, ominaisporauksena 0,26 pm/m<sup>3</sup>, reikäväli/etu suhteena 1,25, ja räjäytettävyyssvakiona 0,5. Tuloksena saadaan S<sub>50</sub> silmäkoon mukaiseksi raekooksi noin 0,25, mikä on hieman suurempi luku kuin yhtälöllä laskettaessa.

Kokeillaan seuraavaksi Kuznetsovin yhtälöä:

$$x = A * (V/Q)^{0,8} * Q^{0,17} * (E/115)^{-0,63}$$

missä  $x$  = Keskimääräinen lohkarekoko (cm)

$A$  = Kivivakio, 7 vähemmän lujille kiville, 10 lujille ja rikkonaisille kiville, 13 lujille vähän rikkonaisille kiville

$V$  = Etu \* reikäväli \* pengerkorkeus

$Q$  = Massa kilogrammoina TNT:tä, mikä vastaa yhdessä reiässä olevan räjähdelainemäärän energiaa TNT:nä (usa lähde)

$E$  = Räjähdelaineen suhteellinen voima, ANFOlla esimerkiksi 100.

[14, s.146-147.]

Sijoitetaan:

$$x = 11 * ((1,9*2,4*6) / (13,50*1,09))^{0,8} * (13,50*1,09)^{0,17} * (100/115)^{-0,63}$$

$$x = 11 * 2,833...$$

$$x \approx 31,16\text{cm}$$

Vastaus on hieman suurempi kuin aiemmilla esimerkeillä, mutta samaa suuruusluokkaa. Huomioon on otettava kivivakion suuri merkitys. Kivivakiolla 7 yhtälön vastaukseksi tulisi 19,8 cm, ja kivivakiolla 13 vastaukseksi tulisi 36,8. Sen painoarvo on siis suuri tässä yhtälössä.

### 3.6 Suuri lohkarekoko

Louhinnassa ei välttämättä aina tavoitella pientä ja tasalaatuista lohkarettä lopputuloksena. Esimerkiksi vesirakentamisessa voidaan käyttää suuria kiviä pato- ja laiturirakenteissa. Suurten lohkareiden louhiminen on hankalaa runsasrakoisessa kalliossa, mutta

vähärakoisessa kalliossa se on mahdollista. Kun halutaan suurta lohkareta, porareiät jätetään pystysuoriksi, ja porauskaavion reikävälin suhde etuun jätetään pienemmäksi kuin 1. Muita tapoja näiden lisäksi on momentaaninen sytytys, ja yhden reikäriivin räjäyttäminen kerrallaan. [8. s 144-115.]

Suurta lohkareta louhittaessa ominaispanostusta pienennetään, suuruusluokkaan 0.2 – 0,25 kg/m<sup>3</sup>. Varman irtoamisen kannalta räjäytetään vain yksi rivi kerrallaan. Pohjapannosta voidaan myös lyhentää, ja korvata varsipanoksella. Tämä aiheuttaa kuitenkin usein kynsiä pohjalla. Riskinä ominaispanostuksen pienentämisessä on se, että kivi ei irtoa kunnolla, ja kenttä jää niin sanotusti lukkoon. Kentän lukkoon meneminen tarkoittaa, että kivi on rakoillut räjäytyksen seurauksena, mutta ei ole liikkunut ollenkaan. Tällöin sen kuormaaminen ei onnistu tai on hyvin hankalaa. [8. s 144-115.]

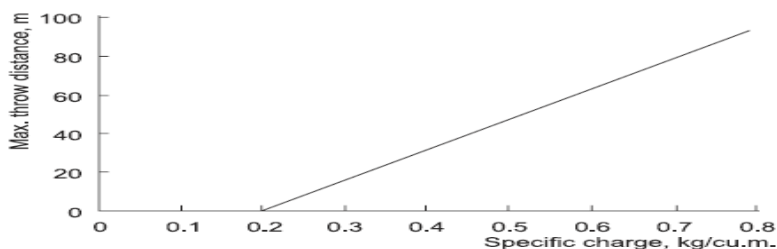
## 4 Siirtymä ja sinkoilu

Louhinnan jälkeisestä louhekasasta voidaan arvioida työn onnistumista muutenkin kuin pelkän lohkarokoon kannalta. Jäljelle jäävästä kivikasasta voi silmäillen huomata kuinka tiivis kasa on, missä kohtaa kasaa erikokoiset lohkarot sijaitsevat, ja kuinka paljon kasa on siirtynyt lähtö tilanteeseen verrattuna. Tätä kiven siirtymää kutsutaan heitoksi. Onnistuneessa louhinnassa heitto on sopiva, eli kivi liikkuu eikä jää lukkoon, ja jäljelle jäävä kivikas on helppo lastata ja kuljettaa pois. Vaarallisen pitkä heitto voi aiheuttaa vaaratilanteita, jos vieressä on esimerkiksi rakennuksia tai koneita.

Sinkoilulla tarkoitetaan yksittäisten kivimurikoiden hallitsematonta sinkoilua ilmaan. Kivet saattavat lentää yllättävän pitkän matkan päähän, ja aiheuttaa henkilö- tai omaisuusvahinkoja, varsinkin asutuskeskuslouhinnassa. Tässä luvussa käydään läpi, mitkä tekijät vaikuttavat räjäytyskentän heittoon ja yksittäisten kivien sinkoiluun, sekä miten niitä hallitaan

### 4.1 Kentän siirtymä

Onnistuneessa räjäytyksessä räjäytettävän kentän painopiste siirtyy vapaata etua kohti. Tästä painopisteen siirtymisestä puhutaan kentän heittona. Onnistunut räjäytys ja heitto jättävät jäljelle helposti lastattavan kivikasan. Heittoon vaikuttaa vahvasti ominaispanostus. Liian pieni ominaispanostus rikkoo kiveä, mutta voi jättää sen paikoilleen, jolloin kuormaaminen on todella hankalaa. Kun ominaispanostus on luokkaa  $0,2 \text{ kg/m}^3$ , se rikkoo kiven mutta ei heitä sitä eteenpäin. Liian iso ominaispanostus puolestaan saattaa aiheuttaa ennalta arvioitua isomman heiton. Yleisimmällä ominaispanostuksella  $0,4 \text{ kg/m}^3$  kentän painopiste siirtyy noin 20 – 30 metriä. Tätä suurempi heitto ei yleensä aiheuta vaaratilanteita, mutta lisää kuormauskustannuksia, kun kivet ovat levällään isolla alueella eikä siistissä kasassa. [8, s.106-107 & 13, s.135-136.]



Kuva 14. Ominaispanostuksen ja heiton suhde. [13, s.136.]

Kuvassa 14 esitetään ominaispanostuksen ja heiton suhde. Ominaispanostuksella 0,4 kg/m<sup>3</sup> maksimi heitto olisi noin 40 metriä.

Ylipanostuksen suhteesta heittoon on tehty seuraavan lainen kaavio [8, s.107]:

Ylipanostus kg/m <sup>3</sup>	Räjätettävän kentän heitto metreinä
0	0
0,05	3,5
0,1	7,0
0,15	10,0
0,20	15

[8, s.107.]

Ominaispanostuksen ohella heittoon vaikuttaa kentän kytkentäkaavio ja hidastus. Ta-voitteena on kuvan 6 mukainen tilanne, missä edellinen rivi toimii suojapeitteenä seuraavaksi räjähtävälle riville. Tällöin heitto on hallittua. Yleissääntö on, ettei aikaväli peräkkäisten tai vierekkäisten reikien välillä saa ylittää 100 ms. Liian pitkä aikaväli saattaa johtaa siihen, että porareikä ryöstää kiveä seuraavalta reiältä, ja siten pienentää seuraavan reiän etua alkuperäiseen suunnitelmaan verrattuna. Ryöstön takana ominaispanostus on nyt alkuperäistä suurempi pienentyneen edun takia. Suurempi ominaispanostus antaa kivelle enemmän liike-energiaa, ja kun aikaisempi reikärivi on jo ehtinyt liikkua liikaa, se ei toimi suojapeitteenä niin kuin tarkoitus on. [8, s.106-107.]

Kytkentäkaaviot vaikuttavat heiton määrään, suuntaan, ja siihen kuinka paljon kivet törmäilevät toisiinsa räjäytyksen aikana. Auran muotoiset kytkentäkaaviot aiheuttavat paljon kivien törmäilyä ilmassa, ja sitä kautta parantaa lohkaroitumista. Auran muotoiset kytkentäkaaviot heittävät kiveä penkereen keskilinjaa kohti, ja heitto pienenee.

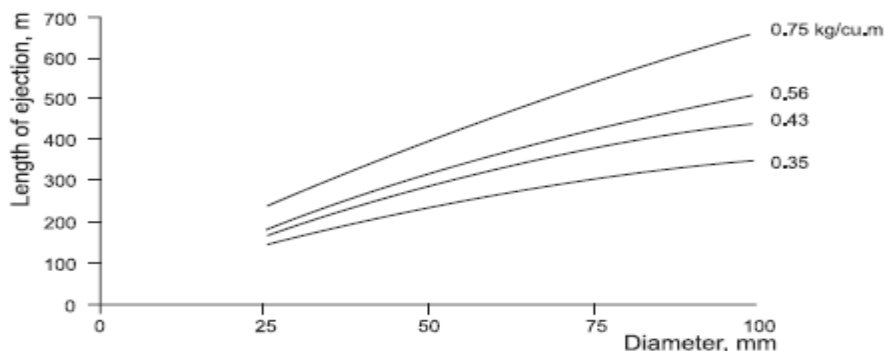
## 4.2 Kiven sinkoutuminen

Yksittäisten kivien sinkoutuminen saattaa aiheuttaa vahinkoja kiinteistöille, kalustolle, ja pahimmassa tapauksessa hengenvaarallisia henkilövahinkoja. Näitä vaaratilanteita tapahtuu lähinnä asutuskeskuslouhinnassa, missä räjäytyskentän läheisyydessä on kiinteistöjä ja ulkopuolisia ihmisiä. Isoissa massalouhinnoissa kaivoksilla ei usein lähistöllä ole muita kiinteistöjä tai ulkopuolisia ihmisiä. Tällöin varautuminen kivien sinkoutumiseen on helpompaa. Isoissa louhinnoissa suoja-etäisyys räjäytyksestä saattaa olla jopa useampi kilometri. Asutuskeskuslouhinnoissa selkein tapa varautua sinkoiluun on peittää räjäytyskentät kumimatoilla. Räjäytettävien kenttien peittäminen asutuskeskuksissa ei ole vapaaehtoista, vaan laissa vaadittu toimenpide. Muita keinoja vaarallisen heiton ja sinkoilun estämiseen asutuskeskuslouhinnoissa on huolellinen poraus, oikea sytytystapa, oikea ominaispanostus, vartiomiesten käyttö ja vaarallisen alueen tyhjänä pitäminen, sekä räjäytysajan valinta. [8, s.341-343.]

Yksittäisten kivien sinkoilu hallitsemattomasti voi johtua reikien niin sanotusta korkkaamisesta, tai virheporauksesta, joka sotkee sytytysjärjestyksen. Porareiän korkkaaminen tarkoittaa etutäytteen ennenaikaista purkautumista porareiästä. Se johtuu liian lyhyestä etutäytteestä, tai siitä että etutäyte ei ole pysynyt porareiässä tarpeeksi pitkään. Etutäyte ei välttämättä pysy reiässä, jos se tehdään liian hienosta aineksesta suhteessa porareiän halkaisijaan. [2.]

Syynä voi myös olla liian lyhyt hidasteaika peräkkäisten reikien välillä, jolloin kivellä ei ole tilaa liikkua vapaata etua kohti. Silloin se liikkuu taivasta kohti. [12.]





Kuva 15. Reikäkoon ja ominaispanostuksen suhde yksittäisten kivien sinkoilun matkaan. [13, s.137.]

Asuttu alue määritellään seuraavasti: *"asutulla alueella tarkoitetaan aluetta, joka ulottuu 200 metrin etäisyydelle asutusta rakennuksesta tai paikasta, jossa ihmisiä tavallisesti oleskelee"* (Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta 644/2011).

Ylipanostuksen estämiseksi asutulla alueella käytetään aina patruunoituja räjähteitä.

Kivien sinkoilun estämiseksi oleellisinta peittämisen ohella on kentän sytytysjärjestelmän muokkaaminen ja huolellinen poraus. Huolellinen poraus siksi, koska panostus- ja räjäytystyö eivät voi onnistua hyvin, jos niitä edeltävä poraus epäonnistuu. Asutuskeskuslouhinnoissa sopiva syttymisväli rivien välillä on 17 – 25 m/s per metri etua. Tavoitteena on kuvan 10 mukainen räjäytys, missä reikäriveillä on tilaa liikkua ja samalla toimia suojauspiteenä seuraavana räjähtävälle rei'ille. [8, s. 112.]

## 5 Kenttätutkimus

Työn aikana kyselin louhinta-alan panostajilta ja työnjohtajilta aiheeseen liittyviä kysymyksiä. Osa vastauksista oli tekemäni kirjallisuustutkimuksen pohjalta odotettuja, mutta sain kuitenkin uuttakin tietoa käytännön tekijöiltä. Totesimme lohkekoon olevan monen tekijän summa, eli siihen voidaan vaikuttaa monella eri tapaa. Käytännössä kallion geologia on ainut asia, mitä ei voida muokata. Reikäkoko, porauskaavio, reikien suuntaus, ominaispanostus, sytytys, kytkentäkaaviot ovat kaikki asioita joita voidaan säädellä työn lopputuloksen muokkaamiseksi. Lopputulos on usein tilaajan määrittelemää. Tarkkuuslouhinnassa voi olla tarkat rajat jäljelle jäävälle kalliolle. Murskaamalla tilaaja voi sanoa tekevänsä raidesepeliä, jolloin louhittaessa pyritään pieneen lohkekokoon ja hienoaineksen minimointiin.

Taloudellisesti ajateltuna, halvin tapa säädellä lohkekokoa on pintahidastimien käytön ja kytkentäkaavion muokkaaminen. Näitä säätelemällä voidaan saada hyvinkin iso ero lopputulokseen pienellä hinnalla suhteessa louhintatyön kokonaishintaan. Erilaisia kytkentäkaavioita on, vaikka kuinka paljon. Haastatteleman panostaja piti auranmuotoista kytkentäkaaviota parhaana pienen lohkekoon kannalta. Auranmuotoinen kytkentäkaavio jättää jälkeensä tiiviimmän ja korkeamman louhekan, kuin perinteinen rivimäinen kytkentäkaavio.



Kuva 16. Räjätetyn kentän etureuna

Kuvassa 16 on onnistuneen räjäytyksen etureuna. Heitto on ollut sopiva, jolloin konekuljettajien on helppo aloittaa louheen kuormaus ja lastaus. Kentän ominaispanostus oli  $0,7 \text{ kg/m}^3$  ja se kytkettiin sähköttömällä NONEL-impulssiletkunalleilla.

Isoissa räjäytyskentissä on mahdollisuus kahden reiän samanaikaiseen räjähtämiseen tietynlaisilla kytkentäkaavioilla, koska NONEL-kytkentäkappaleilla on tietyt ennalta määrätty hidasteajat, toisin kuin tarkasti säädettävillä diginalleilla. Panostajan tehtävänä on laskea todelliset hidasteajat jokaiselle reiälle, jos tavoitteena on yhden reiän kerrallaan räjäyttäminen, ja esiintyy mahdollisuus kahden tai useamman reiän yhtäaikaisesta sytytyksestä. Kahdella reiällä ei tarvitse välttämättä olla samaa syttymisaikaa, koska nalleissa esiintyy pientä hajontaa sytytysajoissa tuotantoteknisistä syistä. Murskaamoilla ei kuitenkaan yleensä ole lähistöllä kiinteistöjä, jolloin lisääntynyt tärinä useamman reiän samanaikaisesta räjähtämisestä ei ole ongelma.



Kuva 17. Räjätetyn kentän takareuna

Kuvassa 17 näkyy selkeästi, mihin kohtaan isoimmat lohkarieet jäävät räjäytyksen jälkeen. Isoimmat lohkarieet tulevat kannesta, mikä johtuu muutamasta tekijästä. Kannessa sijaitsee etutäyte, millä hallitaan sinkoilua ja pyritään vahvistamaan räjähteen vaikutusta kalliossa. Räjäytyksen aikana kallion panostettu osa liikkuu vapaata etua kohti, kun kansi puolestaan liikkuu enemmän ylöspäin kuin eteenpäin. Lopputuloksena on, että kannesta jäävät isommat lohkarieet putoavat takareunaa kohti muun kallion liikkuessa etua kohti.

## 6 Tulokset

Tämän insinöörityön tarkoituksena oli tutkia kiven lohkaroitumista, kiven lohkokokoa, räjäytyskentän heittoa, ja yksittäisten kivien sinkoilua. Työn alussa kirjoitettiin teoriaosuus, mikä koottiin louhinta-alan kirjallisuudesta ja internet lähteistä. Lohkokokoon liittyvä tutkimus tehtiin myöskin alan kirjallisuuden avulla, hyödyntäen alan ammattilaisten kokemuksia asiaan liittyen.

Lohkokoon suunnittelu on yksi työsuunnittelun osa-alueista louhintatöissä. Sen rooli on suurimmillaan ison volyymin louhinnoissa, eli kiviaines- ja kaivostuotannossa. Jokainen louhintakohde on erilainen, ja jokaisessa louhintakohteessa lohkokoon rooli on erilainen. Lohkokoon suunnittelu ja optimointi ovat kustannusten kanssa tasapainoilua. Pienemmän lohkokoon saavuttamiseksi poraus- ja panostuskustannukset kasvavat, mutta lastaus, louhinta ja kuljetuskustannukset pienenevät. Työsuunnittelijan tehtävä on löytää näiden pohjalta optimaalisin ratkaisu ennen kuin töihin ryhdytään.

Heti työn alussa huomattiin, että lohkokokoon voidaan vaikuttaa monella eri tapaa. Porauksella, panostuksella ja kytkentäkaavioilla voidaan kaikilla vaikuttaa lohkokokoon. Kallion geologisilla ominaisuuksilla on myös tärkeä merkitys lohkokoon optimoinnissa. Kallion geologiset ominaisuudet ovat ainoa asia, mitkä vaikuttavat lohkokokoon, mutta mitä ei voida työsuunnitteluvaiheessa muuttaa suuntaan tai toiseen. Siksi louhintatyötä edeltävät tutkimukset ovat tärkeitä, jotta työsuunnitteluvaiheessa tiedetään, milaista kiveä on aikomus louhia.

Kallion rakoilu on tärkeä ominaisuus lohkokokoa arvioitaessa. Tiheärakoisessa kalliossa ruutukoon kasvaessa kasvaa riski siitä, että räjähdysen aikana vapautuva energia purkautuu kalliossa rakoja pitkin, jolloin se ei riko kiveä parhaalla mahdollisella tavalla. Tämän voi välttää pienentämällä reikäkokoja ja ruutukokoja. Poraus- ja panostuskustannukset kasvavat, mutta lopputuloksena on parempi lohkaroituminen ja pienempi lohkokoko.

Porauskaavioissa käytännön kokemus on osoittanut reikävälin ja edun suhteen 1,25 olevan paras lohkaroitumisen kannalta. Porauksessa tärkeää on myös sen tarkkuus, ja virheporauksen minimointi. Tarkka poraus pitää edun ja reikävälin suunnitelmien mukaisena, ja räjähddeaine on kalliossa suunnitelmien mukaisesti, eikä epätasaisesti.

Räjähdeaineista emulsioräjähteet ovat hyvä valinta, kun tavoitellaan pientä lohkar kokoa. Emulsio tiivistyy porareian pohjaa kohti, ja tiheyden kasvaessa panostusaste kasvaa porareian pohjalla. Panostusasteen kasvaminen edesauttaa lohkaroitumista. Etutäyteen merkitystä ei pidä unohtaa. Etutäyte pitää paineen yllä hieman pidempään porareiaässä, jolloin räjähdyskaasut rikkovat kalliota paremmin sen sijaan että ne purkautuisivat taivasta kohti reiän suulta. Toisaalta pitkä etutäyte huonontaa lohkaroitumista räjäytettävän kentän yläosassa. Yksi mahdollisuus on porata apureikiä varsinaisten porareikien väliin, ja sitä kautta parantaa yläosan lohkaroitumista. Tämä lisää poraus- ja panostuskustannuksia, eli se ei tule aina kyseeseen.

Sytytyskaavion ja hidastuksen säätäminen on halvin keino vaikuttaa lohkar kokoon. Haastattelemani panostaja piti auran muotoista sytytyskaaviota parhaimpana, kun tavoitellaan maksimaalista lohkaroitumista. Pienillä hidasteajoilla, luokkaa 3-5ms per metri etua, on todettu saatavan paras lohkaroituminen. Auran muotoinen kytkentäkaavio ja lyhyet hidasteajat lisäävät kivien törmäilyä ilmassa, ja parantavat sitä kautta lohkaroitumista.

Lohkar kokoon arviointiin on tehty useita malleja ja yhtälöitä vuosien mittaan. Työssä kehitettiin esimerkinomaisesti muutamaa näistä yhtälöistä. Tulokset poikkesivat hieman toisistaan, mutta suuruusluokka oli sama. Tähän vaikutti se, että kokeilemani yhtälöt olivat eri aikakausilta, ja niissä otettiin huomioon hieman eri asioita. Painotus eri lähtötekijöiden välillä oli myös hieman erilainen. Lohkar kokoon arviointiin kehitetyt mallit yhdistettynä tietokoneohjelmaan on oiva työkalu työsuunnittelun ja seurannan apuna.

Räjäytettävän kentän heittoon vaikuttaa ominaispanostus, mahdollinen ylipanostus ja hidasteajat reikien välillä. Liian pieni ominaispanostus rikkoo kiven, mutta ei heitä sitä eteenpäin, jolloin lastaaminen on vaikeaa tai mahdotonta. Ominaispanostuksen kasvattaminen ja mahdollinen ylipanostus kasvattavat heiton määrää. Hidastamisen tarkoituksena on pienentää tärinöitä ja tehdä räjäytyksestä hallitumpi. Sopivana aikavälinä pidetään peräkkäisissä rei'issä 13-25ms / m etua, ja vierekkäisissä 5-10ms / m etua. Kun syttymisaikaväli on sopiva, toimii räjähtänyt reikärivi suojapeitteenä seuraavalle reikäriville. Liian lyhyet ja liian pitkät syttymisaikavälit lisäävät heittoa ja yksittäisten kivien sinkeilyä.

Yksittäisten kivien sinkoilu saattaa johtua virheporauksesta, joka sotkee sytytysjärjestyksen. Myös liian pienet aikavälit reikien välillä, tai huolimaton etutäyttö voi aiheuttaa sinkoilua. Yksittäiset kivet saattavat sinkoilla satojen metrien päähän. Matka riippuu reikäkoosta ja ominaispanostuksesta.  $0,4 \text{ kg/m}^3$  ominaispanostuksella ja 76 mm reikäkoolla kivi saattaa sinkoutua 400 m päähän. Kivien sinkoilu voi aiheuttaa vakavia vaaratilanteita asutuskeskuslouhinnoissa. Tämän estämiseksi on laissa säädetty tiettyjä toimenpiteitä, jotka pitää ottaa huomioon asutuskeskuslouhinnoissa.



## 7 Pohdinta

Louhinta-alan peruseriaate on ollut samanlainen jo vuosikymmenien ajan. Tulevaisuudessa on mielenkiintoista nähdä, tuleeko tähän peruskaavioon (poraaminen, panostus, räjäytys) mitään suurempia muutoksia. Uskon ainakin, että uusia ja entistä tarkempia tarkkuuslouhintamenetelmiä tullaan keksimään, kun louhintatöissä vaadittu tarkkuus nousee koko ajan.

Toinen mielenkiintoinen asia on räjähteiden ja kaluston kehitys. Kasvaako emulsioräjähteiden suosio tulevaisuudessa entisestään, vai kehitetäänkö uusia turvallisempia ja ympäristöystävällisiä räjähdettäviä. Kaluston kehityksessä koneohjaus on nyt jo iso tekijä, kuten muuallakin infra-rakentamisessa. Mielenkiintoista on nähdä se, että miten sen kehittyminen vaikuttaa porarien ammattitaitoon, kun koneista tulee automaattisempia.

Lohkarekoon arviointiin, kuten muidenkin louhintatöiden osa-alueiden arviointiin kehitetään varmasti koko ajan tarkempia ja tarkempia menetelmiä. Saa nähdä, kuinka tarkaksi nämä menetelmät kehittyvät, ja miten paljon se vaikuttaa varsinaiseen työsuunnitteluun. Siirtyykö tulevaisuudessa painopiste enemmän ja enemmän työsuunnittelun suuntaan, jättäen varsinaisille työsuorittajille, eli porareille ja panostajille vähemmän paikan päällä tehtäviä päätöksiä.



## Lähteet

1 Helsingin kaupunki, kalliorakentaminen. 09.03.2017 Verkkodokumentti.

<http://www.hel.fi/www/helsinki/fi/asuminen-ja-ymparisto/tontit/maa-ja-kalliopera/geotekniikka/kalliorakentaminen>

2 Louhinta etenee aikataulussa – 400 000 asukkaan jätevedet puhdistava laitos valmistuu vuonna 2020. 20.1.2017 Verkkodokumentti

<http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/rakennus/louhinta-etenee-aikataulussa-400-000-asukkaan-jatevedet-puhdistava-laitos-valmistuu-vuonna-2020-6616889>

3 Yli 200 000 kuutiota maata myllätään keskellä Helsinkiä – Olympiastadionin maarakennus- ja louhintatyöt käynnistyvät. 1.3.2016 Verkkodokumentti

<http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/rakennus/yli-200-000-kuutiota-maata-myllataan-keskella-helsinki-olympiastadionin-maarakennus-ja-louhintatyot-kaynnistyvat-6308596>

4 Kiviainekset Kiertotaloudessa. 28.10.2015 Esa Berg Verkkodokumentti

<https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/infra/ajankohtaista/esitysaineistot/kiviainekset-kiertotaloudessa-28.10.2015/berg.pdf>

5 Kalliokiviaines, Geologian tutkimuskeskus

<http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/kalliokiviaines/>

6 Kaivannaisala, Geologian tutkimuskeskus (GTK), Kiviteollisuusliitto ry, Kaivosteollisuus ry, Infra ry, Keski-Pohjanmaan ammattiopisto & Keski-Pohjanmaan aikuiskoulutus sekä Centria-ammattikorkeakoulu.

<https://kaiva.fi/kaivannaisala/>

7 Jättemäärien ennakkointi vuoteen 2030. Kesäkuu 2015. Hanna Salmenperä, Katja Moiliis ja Sanna-Mari Nevala

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/155189/YMr\\_a\\_17\\_2015.pdf?sequence](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/155189/YMr_a_17_2015.pdf?sequence)

8 Räjätystyöt. 2012. Tommi Halonen & Raimo Vuolio. Helsinki: Suomen rakennusmedia Oy

9 Kaivos ja louhintatekniikka. 2011. Antero Hakapää & Pekka Lappalainen. Vammalan kirjapaino Oy

10 Influence of blasting on the size distribution and properties of muckpile fragments, a state-of-the-art review. 2003. Finn Ouchterlony. Luleå University of Technology.

11 Rock Fragmentation Control in Blasting. 2004. Sang Ho Cho & Katsuhiko Kaneko. Hokkaido University

12 Olli Vaaramaa, henkilökohtainen tiedonanto

13 Rock Excavation Handbook 1999. Matti Heinio. Sandvik AB

14 Rock Blasting and Overbreak Control. 1991. Calvin J Konya, Edward J. Walter. U.S Department of Transportation

15 E. Hartikainen Oy poraa uudistuneella Sandvik DX780 poralaitteella. 8.6.2012. Verkkodokumentti

<http://www.koneporssi.com/uutiset/e-hartikainen-oy-poraa-uudistuneella-sandvik-dx780-poralaitteella/>

16 *Valtioneuvoston asetus räjäytys- ja louhintatöiden turvallisuudesta (644/2011)*

17 *Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta (390/2005)*

